电工/电子技能实践课堂系列丛书

电工入门
知识与实践课堂

蔡杏山　主编

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 • BEIJING

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

内 容 简 介

本书是一本电工技术入门的图书。本书主要介绍了电工入门基础、常用电工仪表的使用、电感器和电容器、变压器、低压电器、室内配电线路的安装、安全用电、电动机及三相异步电动机的控制线路等内容。

为了使初学者通过阅读本书就能轻松快速迈入电工技术大门，本书在章节内容安排上按照循序渐进的原则，在语言表达上注重通俗易懂，在形式上采用了大量的表格和图片，另外，在书的重点和关键内容上采用了粗体和阴影处理，以让读者能够掌握并记住这些内容。

本书具有起点低、内容由浅入深、语言通俗易懂的特点，并且内容结构安排符合学习认知规律。本书适合作为电工初学者学习电工技术的自学图书，也适合作为职业院校电类专业的电工入门教材。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

电工入门知识与实践课堂 / 蔡杏山主编. —北京：电子工业出版社，2010.1
（电工/电子技能实践课堂系列丛书）
ISBN 978-7-121-10088-8

Ⅰ. 电…　Ⅱ. 蔡…　Ⅲ. 电工技术　Ⅳ. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2009）第 230616 号

策划编辑：赵丽松
责任编辑：雷洪勤
印　　刷：
装　　订：
出版发行：电子工业出版社
　　　　　北京市海淀区万寿路 173 信箱　邮编　100036
开　　本：787×1 092　1/16　印张：14.75　字数：378 千字
印　　次：2010 年 1 月第 1 次印刷
印　　数：0 000 册　　定价：28.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

前　言

电工技术和电子技术都属于电类技术，两者的区别在于，电工技术是强电技术，其处理的电信号电压高、电流大；而电子技术属于弱电技术，主要处理电压低、电流小的电信号。在早期，电工技术和电子技术区分还比较明显，但现代社会两种技术的融合越来越紧密，大量的电气设备既含有电工技术，又含有电子技术。当今社会既需要电子技术人才和电工技术人才，更需要同时掌握电子、电工技术的复合型人才。

一、本书章节简介

本书为电工技术的入门图书，共有 9 章，各章节内容简要说明如下。

章　节	内 容 说 明
第 1 章　电工入门基础	学习电工技术，必须先掌握电工基础知识，为后面的学习打下扎实的根基。本章主要介绍了电路的基本概念及规律、电阻的连接、电磁知识、直流电与交流电及三相交流电的产生与供电方式
第 2 章　常用电工仪表的使用	电工仪表是检测电气线路的电阻、电压、电流、电量和绝缘电阻等参数的工具。本章主要介绍了指针万用表、数字万用表、电度表、钳形电流表和兆欧表的使用
第 3 章　电感器和电容器	电感器和电容器是电气线路中的常用器件。本章主要介绍了电感器、电容器的性质、参数、种类和检测等内容
第 4 章　变压器	变压器是一种用来升降电压和改变电流大小的电气设备。本章主要介绍了变压器的基础知识、三相变压器、电力变压器和自耦变压器
第 5 章　低压电器	低压电器是指用在交流电压 1200V 或直流电压 1500V 以下的电气器件。本章主要介绍了开关、熔断器、断路器、接触器和继电器等低压电器的结构、原理、选用和检测等内容
第 6 章　室内配电线路的安装	在室内安装配电线路是电工技术的一项基本功。本章主要介绍了照明光源、导线的选择与连接和室内配电布线
第 7 章　安全用电	在电工作业时，由于所接触的电压电流都比较大，为了避免操作时出现触电而造成人体伤害，需要掌握一些安全用电方面的知识。本章主要介绍了人体触电的几种方式、接地与接零和接地装置的安装
第 8 章　电动机	电动机是一种将电能转换为机械能的设备。本章主要介绍了三相异步电动机、直流电动机和单相异步电动机
第 9 章　三相异步电动机的控制线路	大多数工业机械设备采用三相异步电动机作为动力源，对它进行各种控制需用到相应的控制线路。本章主要介绍了正转控制线路、正反转控制线路、限位控制线路、自动往返控制线路、顺序控制线路、多地控制线路、降压启动控制线路、绕线转子电动机启动控制线路、制动控制线路和多速异步电动机调速控制线路

二、本书特点

本书主要有以下特点：

1．章节安排符合人的认识规律。读者只需从前往后逐章节阅读本书，便会水到渠成掌握书中内容。

2．起点低，语言通俗易懂。读者只需有初中文化程度便可阅读本书，由于语言通俗易懂，阅读时会感觉很顺畅。

3．采用大量的图片和表格来阐述知识。

4．知识要点用加粗文字，重点标注。

5．免费网络答疑。读者在学习过程中遇到疑难问题，可以登录易天教学网（www.eTV100.com）进行提问，也可观看网站上与图书有关的辅导材料。

本书在编写过程中得到了易天教学网很多教师的支持，参加编写的人员有：蔡杏山、蔡玉山、詹春华、何慧、黄晓玲、蔡春霞、邓艳姣、黄勇、刘凌云、刘元能。

由于我们水平有限，书中存在错误和疏漏在所难免，望广大读者和同仁予以批评指正。

为适应教学要求，本书提供了电子教学参考资料包，有需求的教师可与电子工业出版社赵丽松联系（E-mail:zls@phei.com.cn）。

编　者

目　　录

第 1 章　电工入门基础 …… 1
1.1　电路的基本概念及规律 …… 2
1.1.1　电路与电路图 …… 2
1.1.2　电流与电阻 …… 2
1.1.3　电位、电压和电动势 …… 4
1.1.4　电路的三种状态 …… 5
1.1.5　欧姆定律 …… 5
1.1.6　电功、电功率和焦耳定律 …… 8
1.2　电阻的连接 …… 9
1.2.1　电阻的串联 …… 9
1.2.2　电阻的并联 …… 10
1.2.3　电阻的混联 …… 11
1.3　电磁知识 …… 11
1.3.1　磁铁与磁性材料 …… 11
1.3.2　通电导体产生的磁场 …… 12
1.3.3　通电导体在磁场中受到的力 …… 13
1.3.4　电磁感应 …… 14
1.4　直流电与交流电 …… 16
1.4.1　直流电 …… 16
1.4.2　交流电 …… 17
1.5　三相交流电的产生与供电方式 …… 21
1.5.1　三相交流电的产生 …… 21
1.5.2　三相交流电的供电方式 …… 22
第 2 章　常用电工仪表的使用 …… 24
2.1　指针万用表 …… 25
2.1.1　面板介绍 …… 25
2.1.2　使用前的准备工作 …… 27
2.1.3　测量直流电压 …… 28
2.1.4　测量交流电压 …… 29
2.1.5　测量直流电流 …… 29
2.1.6　电阻的测量 …… 30
2.1.7　万用表使用注意事项 …… 31
2.2　数字万用表 …… 31
2.2.1　面板介绍 …… 32

2.2.2 测量直流电压 32
2.2.3 测量交流电压 33
2.2.4 电阻的测量 34
2.3 电度表 34
2.3.1 电度表的结构与原理 34
2.3.2 电度表的接线方式 36
2.3.3 用电度表测量电器的功率 38
2.3.4 电子式电度表 39
2.4 钳形表 40
2.4.1 钳形表的结构与测量原理 41
2.4.2 指针式钳形表 41
2.4.3 数字式钳形表 43
2.5 兆欧表 44
2.5.1 摇表 44
2.5.2 指针式兆欧表 48
2.5.3 数字式兆欧表 50
第 3 章 电感器和电容器 53
3.1 电感器 54
3.1.1 外形与符号 54
3.1.2 主要参数与标注方法 54
3.1.3 性质 55
3.1.4 种类 57
3.1.5 检测 58
3.2 电容器 58
3.2.1 结构、外形与符号 58
3.2.2 主要参数 59
3.2.3 性质 59
3.2.4 种类 62
3.2.5 电容器的串联与并联 66
3.2.6 容量与误差的标注方法 67
3.2.7 常见故障及检测 69
第 4 章 变压器 71
4.1 变压器的基础知识 72
4.1.1 结构 72
4.1.2 功能 73
4.1.3 极性 74
4.2 三相变压器 75
4.2.1 电能的传送 75
4.2.2 三相变压器 76

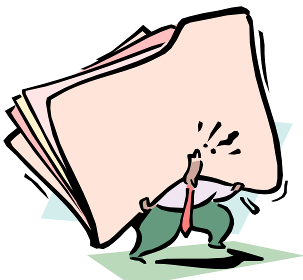
4.2.3 三相变压器的供电连接方式…77
4.3 电力变压器…79
4.3.1 外形与结构…79
4.3.2 型号说明…80
4.3.3 连接方式…81
4.4 自耦变压器…81
4.4.1 结构与原理…81
4.4.2 实物外形…82
第 5 章 低压电器…83
5.1 开关…84
5.1.1 开启式负荷开关…84
5.1.2 封闭式负荷开关…85
5.1.3 组合开关…85
5.1.4 倒顺开关…86
5.1.5 按钮开关…87
5.1.6 行程开关…88
5.1.7 接近开关…89
5.1.8 万能转换开关…90
5.1.9 开关的检测…90
5.2 熔断器…91
5.2.1 型号含义…91
5.2.2 种类及特点…92
5.2.3 熔断器的检测…93
5.3 断路器…94
5.3.1 结构与原理…94
5.3.2 种类…95
5.3.3 型号含义…96
5.3.4 断路器的检测…96
5.3.5 漏电保护器…97
5.4 接触器…98
5.4.1 交流接触器…98
5.4.2 直流接触器…99
5.4.3 接触器的选用…100
5.4.4 接触器的检测…100
5.5 继电器…101
5.5.1 热继电器…101
5.5.2 电流继电器…103
5.5.3 电压继电器…104
5.5.4 中间继电器…105

5.5.5 时间继电器 106
5.5.6 速度继电器 107
5.5.7 压力继电器 109
5.5.8 继电器的检测 109
第 6 章 室内配电线路的安装 111
6.1 照明光源 112
6.1.1 白炽灯 112
6.1.2 荧光灯 112
6.1.3 卤钨灯 114
6.1.4 高压汞灯 115
6.2 导线的选择与连接 117
6.2.1 导线的选择 117
6.2.2 导线的连接 122
6.3 室内配电布线 128
6.3.1 配电方案的设计 128
6.3.2 布线 130
6.3.3 插座和开关的安装 137
6.3.4 配电箱的安装 140
第 7 章 安全用电 143
7.1 人体触电的几种方式 144
7.1.1 电流对人体的伤害 144
7.1.2 触电的几种方式 145
7.2 接地与接零 147
7.2.1 接地 147
7.2.2 接零 148
7.2.3 重复接地 148
7.3 接地装置的安装 150
7.3.1 接地体的安装 150
7.3.2 接地线的安装 151
第 8 章 电动机 154
8.1 三相异步电动机 155
8.1.1 工作原理 155
8.1.2 外形与结构 157
8.1.3 接线方式 159
8.1.4 电动机的铭牌 160
8.2 直流电动机 161
8.2.1 工作原理与结构 161
8.2.2 种类与特点 164
8.3 单相异步电动机 166

8.3.1 分相式单相异步电动机 …… 166
8.3.2 罩极式单相异步电动机 …… 171
第 9 章 三相异步电动机的控制线路 …… 173
9.1 正转控制线路 …… 174
9.1.1 简单的正转控制线路 …… 174
9.1.2 点动正转控制线路 …… 174
9.1.3 自锁正转控制线路 …… 176
9.1.4 带过载保护的自锁正转控制线路 …… 178
9.1.5 连续与点动混合控制线路 …… 178
9.2 正、反转控制线路 …… 180
9.2.1 倒顺开关正、反转控制线路 …… 180
9.2.2 接触器连锁正、反转控制线路 …… 181
9.2.3 按钮连锁正、反转控制线路 …… 182
9.2.4 按钮、接触器双重连锁正、反转控制线路 …… 184
9.3 限位控制线路 …… 185
9.4 自动往返控制线路 …… 187
9.5 顺序控制线路 …… 188
9.6 多地控制线路 …… 190
9.7 降压启动控制线路 …… 191
9.7.1 定子绕组串接电阻降压启动控制线路 …… 191
9.7.2 自耦变压器降压启动控制线路 …… 193
9.7.3 星形－三角形（Y－Δ）降压启动控制线路 …… 198
9.7.4 延边三角形降压启动控制线路 …… 201
9.8 绕线转子电动机启动控制线路 …… 203
9.8.1 绕线转子电动机转速调速与启动方式 …… 203
9.8.2 转子绕组串接电阻启动控制线路 …… 205
9.8.3 转子绕组串接频敏变阻器启动控制线路 …… 208
9.8.4 凸轮控制器启动、调速和正反转控制线路 …… 210
9.9 制动控制线路 …… 212
9.9.1 机械制动线路 …… 212
9.9.2 电力制动线路 …… 215
9.10 多速异步电动机调速控制线路 …… 221
9.10.1 双速异步电动机调速控制线路 …… 221
9.10.2 三速异步电动机调速控制线路 …… 224

第 1 章

电工入门基础



问：老师，初学者应该如何学习电工技术呢？

答：初学者在学习电工技术时先要掌握基础知识，如电学基本概念、规律和电磁知识等，为后面的学习打下理论基础。



1.1 电路的基本概念及规律

1.1.1 电路与电路图

图 1-1（a）所示是一个比较简单的实物电路。

从图 1-1（a）可以看出，该电路由电源、开关、导线和灯泡组成。电源的作用是提供电能；开关、导线的作用是控制和传递电能，称为中间环节；灯泡是消耗电能的用电器，它能将电能转变为光能，称为负载。因此，**电路是由电源、中间环节和负载组成的**。

用绘制实物的方式来画电路很不方便，为此人们就**用一些简单的图形符号表示实物的方法来画电路，这样画出的图形就称为电路图。**如图 1-1（b）所示的图形就是图 1-1（a）实物电路的电路图，可以看出，用电路图来表示实际的电路非常方便。

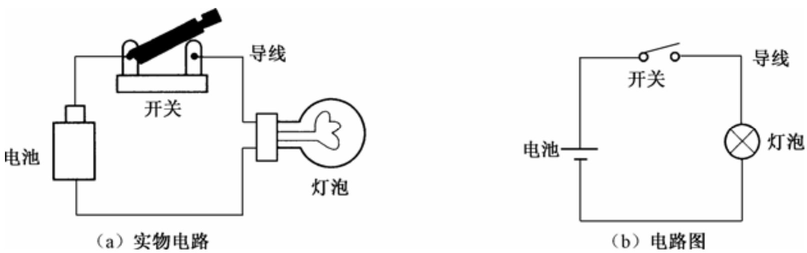


图 1-1　一个简单的电路

1.1.2 电流与电阻

1．电流

在如图 1-2 所示的电路中，将开关闭合，灯泡会发光，为什么会这样呢？下面就来解释其中的原因。

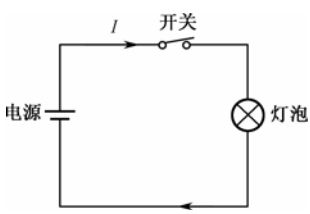


图 1-2　电流说明图

当开关闭合时，电源正极会流出大量的电荷，它们经过导线、开关流进灯泡，再从灯泡流出，回到电源的负极，这些电荷在流经灯泡内的钨丝时，钨丝会发热，温度急剧上升从而发光。

大量的电荷朝一个方向移动（也称定向移动）就形成了电流，这就像公路上有大量的汽车朝一个方向移动就形成“车流”一样。一般把**正电荷在电路中的移动方向规定为电流的方向。**如图 1-2 所示电路的电流方向是：电源正极→开关→灯泡→电源负极。

电流通常用“*I*”表示，单位为安培（简称安），用“A”表示，比安培小的单位有毫安（mA）、微安（μA），它们之间的关系是：$1A=10^3mA=10^6\mu A$。

2．电阻

在如图 1-3（a）所示的电路中，给电路增加一个元器件——电阻器，发现灯泡会变暗，该电路的电路图如图 1-3（b）所示。为什么在电路中增加了电阻器后，灯泡会变暗呢？原来电阻器对电流有一定的阻碍作用，从而使灯泡流过的电流减少，灯泡就会变暗。

导体对电流的阻碍称为电阻，电阻通常用“R”表示，电阻单位为欧姆（简称欧），用“Ω”表示，比欧姆大的单位有千欧（kΩ）、兆欧（MΩ），它们之间的关系是：$1M\Omega=10^3k\Omega=10^6\Omega$。

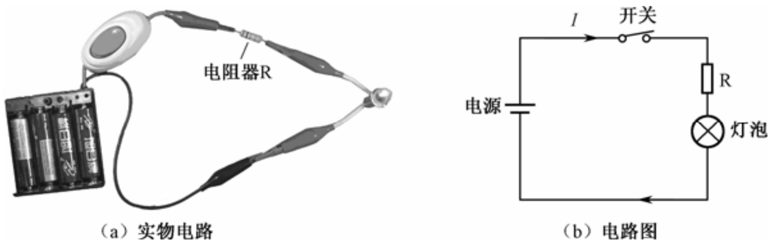


图 1-3　电阻说明图

导体的电阻计算公式为：

$$R=\rho\frac{L}{S}$$

式中，*L* 为导体长度（单位：m），*S* 为导体的横截面积（单位：m^2），ρ为导体的电阻率（单位：Ω•m），不同的导体，ρ的值一般不同。表 1-1 列出了一些常见导体的电阻率（20℃时）。

表 1-1　一些常见导体的电阻率（20℃时）

导　体	电阻率/Ω•m	导　体	电阻率/Ω•m
银	1.62×10^{-8}	锡	11.4×10^{-8}
铜	1.69×10^{-8}	铁	10.0×10^{-8}
铝	2.83×10^{-8}	铅	21.9×10^{-8}
金	2.4×10^{-8}	汞	95.8×10^{-8}
钨	5.51×10^{-8}	碳	3500×10^{-8}

在长度 *L* 和横截面积 *S* 相同的情况下，电阻率越大的导体其电阻越大，例如 *L*、*S* 相同的铁线和铜线，铁线的电阻是铜线的 5.9 倍，由于铁线的电阻率较铜线大很多，为了使负载能得到较大电流并减小供电线路损耗，供电线路通常采用铜线。

导体的电阻除了与材料有关外，还受温度的影响。一般情况下，导体温度越高，其电阻越大，例如常温下灯泡（白炽灯）内部钨丝的电阻很小，但是当钨丝的温度升高到 1000℃以上，其电阻会急剧增大；导体温度下降，其电阻会减小，有些金属材料在温度下降到某一值（如–109℃）时，电阻会突然变为零，这种现象称为超导现象，具有这种性质的材料称为超导材料。

1.1.3 电位、电压和电动势

电位、电压和电动势对初学者较难理解，下面通过如图 1-4 所示的水流示意图来说明这些术语。首先来分析图 1-4 中的水流过程。

水泵将河中的水抽到山顶的 A 处，水到达 A 处后再流到 B 处，到达 B 处后再流往 C 处（河中），然后水泵又将河中的水抽到 A 处，这样使得水不断循环流动。水为什么能从 A 处流到 B 处，又从 B 处流到 C 处呢？这是因为 A 处水位较 B 处水位高，B 处水位较 C 处水位高。

要测量 A 处和 B 处水位的高度，必须先要找一个基准点（零点），就像测量人体身高要选择脚底为基准点一样，在这里以河的水平面为基准（C 处）。AC 之间的垂直高度 H_A 为 A 处水位的高度，BC 之间的垂直高度 H_B 为 B 处水位的高度，由于 A 处和 B 处水位高度不一样，它们存在着水位差，该水位差用 H_{AB} 表示，它等于 A 处水位高度 H_A 与 B 处水位高度 H_B 之差，即 $H_{AB}=H_A-H_B$。为了让 A 处源源不断有水往 B、C 处流，需要水泵将低水位的河中的水抽到高处的 A 点，这样做水泵是需要消耗能量的（如耗油）。

1．电位

电路中的电位、电压和电动势与上述水流情况很相似。在如图 1-5 所示的电路中，电源的正极输出电流，流到 A 点，再经 R_1 流到 B 点，然后通过 R_2 流到 C 点，最后流到电源的负极。

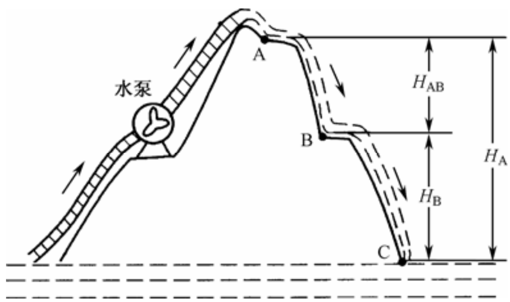


图 1-4 水流示意图

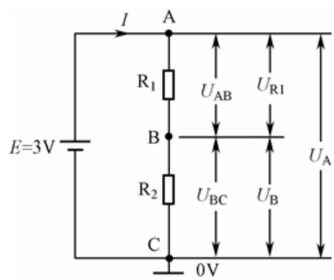


图 1-5 电位、电压和电动势说明图

与图 1-4 水流示意图相似，图 1-5 电路中的 A、B 点也有高低之分，只不过不是水位，而称做电位，A 点电位较 B 点电位高。为了计算电位的高低，也需要找一个基准点作为零点，为了表明某点为零基准点，通常在该点处画一个“⊥”符号，该符号称为接地符号，接地符号处的电位规定为 0V，电位单位不是米，而是伏特（简称伏），用 V 表示。在如图 1-5 所示电路中，以 C 点为 0V（该点标有接地符号），A 点的电位为 3V，表示为 U_A=3V，B 点电位为 1V，表示为 U_B=1V。

2．电压

图 1-5 电路中的 A 点和 B 点的电位是不同的，有一定的差距，这种**电位之间的差距称为电位差，又称电压。**A 点和 B 点之间的电位差用 U_{AB} 表示，它等于 A 点电位 U_A 与 B 点电位 U_B 的差，即 $U_{AB}=U_A-U_B$=3V−1V=2V。因为 A 点和 B 点电位差实际上就是电阻器 R_1 两端的电位差（电压），R_1 两端的电压用 U_{R1} 表示，所以 $U_{AB}=U_{R1}$。

3．电动势

为了让电路中始终有电流流过，电源需要在内部将流到负极的电流源源不断地“抽”到正极，使电源正极具有较高的电位，这样正极才会输出电流。当然，电源内部将负极的电流“抽”到正极需要消耗能量（如干电池会消耗掉化学能）。**电源消耗能量在两端建立的电位差称为电动势**，电动势的单位也为伏特（V），图 1-5 电路中电源的电动势为 3V。

由于电源内部的电流方向是由负极流向正极，故**电源的电动势方向规定为从负极指向正极。**

1.1.4　电路的三种状态

电路有三种状态：通路、开路和短路，这三种状态的电路如图 1-6 所示。

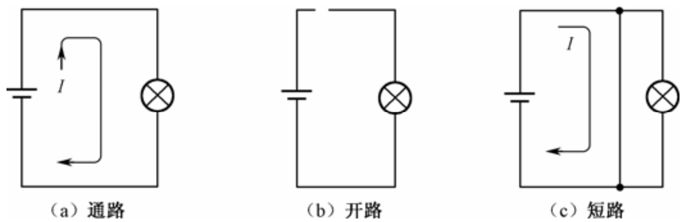


图 1-6　电路的三种状态

1．通路

图 1-6（a）中的电路处于通路状态。**电路处于通路状态的特点有：电路畅通，有正常的电流流过负载，负载正常工作。**

2．开路

图 1-6（b）中的电路处于开路状态。**电路处于开路状态的特点有：电路断开，无电流流过负载，负载不工作。**

3. 短路

图 1-6（c）中的电路处于短路状态。**电路处于短路状态的特点有：电路中有很大的电流流过，但电流不流过负载，负载不工作。**由于电流很大，很容易烧坏电源和导线。

1.1.5　欧姆定律

欧姆定律是电子技术中的一个最基本的定律，它反映了电路中电阻、电流和电压之间的关系。欧姆定律包括部分电路欧姆定律和全电路欧姆定律。

1．部分电路欧姆定律

部分电路欧姆定律的内容是：在电路中，流过电阻的电流 *I* 的大小与电阻两端的电压 *U* 成正比，与电阻 *R* 的大小成反比。即

$$I = \frac{U}{R}$$

也可以表示为 $U=IR$ 和 $R=\frac{U}{I}$ 。

为了更好地理解部分电路欧姆定律，下面以图 1-7 为例来说明。

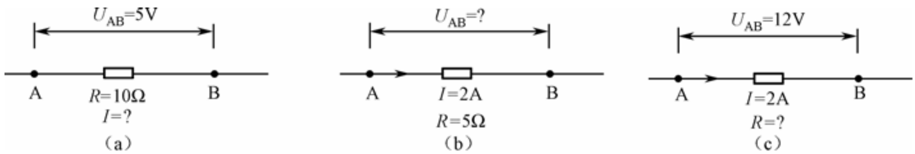


图 1-7　部分电路欧姆定律的几种形式

在图 1-7（a）中，已知电阻 R=10Ω，电阻两端电压 U_{AB}=5V，那么流过电阻的电流 $I=\frac{U_{AB}}{R}=\frac{5}{10}$=0.5A。

在图 1-7（b）中，已知电阻 R=5Ω，流过电阻的电流 I=2A，那么电阻两端的电压 $U_{AB}=I\cdot R=2\times5=10V$。

在图 1-7（c）中，已知流过电阻的电流 I=2A，电阻两端的电压 U_{AB}=12V，那么电阻的大小 $R=\frac{U}{I}=\frac{12}{2}$=6Ω。

下面以图 1-8 所示的电路来说明部分欧姆定律的应用。

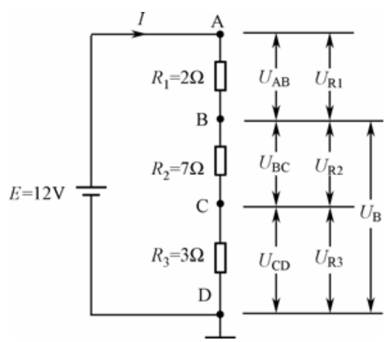


图 1-8　部分电路欧姆定律的应用说明图

在图 1-8 中，电源的电动势 E=12V，它与 A、D 之间的电压 U_{AD} 相等，三个电阻 R_1、R_2、R_3 串接起来，可以相当于一个电阻 R，$R=R_1+R_2+R_3=2+7+3=12Ω$。知道了总电阻 R 的大小和总电阻两端的电压，就可以求出流过电阻的电流 I：

$$I=\frac{U}{R}=\frac{U_{AD}}{R_1+R_2+R_3}=\frac{12}{12}=1A$$

求出了流过 R_1、R_2、R_3 的电流 I，并且它们的电阻大小已知，就可以求 R_1、R_2、R_3 两端的电压 U_{R1}（U_{R1} 实际就是 A、B 两点之间的电压 U_{AB}）、U_{R2} 和 U_{R3}：

$$U_{R1}=U_{AB}=I\cdot R_1=1\times2=2V$$

$$U_{R2}=U_{BC}=I\cdot R_2=1\times7=7V$$

$$U_{R3}=U_{CD}=I\cdot R_3=1\times3=3V$$

从上面可以看出：$U_{R1}+U_{R2}+U_{R3}=U_{AB}+U_{BC}+U_{CD}=U_{AD}=12V$

在图 1-8 中如何求 B 点电压呢？首先要明白，求**某点电压指的就是求该点与地之间的电压，**所以 B 点电压 U_B 实际就是电压 U_{BD}，求 U_B 有两种方法：

方法一：$U_B=U_{BD}=U_{BC}+U_{CD}=U_{R2}+U_{R3}=7+3=10V$

方法二：$U_B=U_{BD}=U_{AD}-U_{AB}=U_{AD}-U_{R1}=12-2=10V$

2．全电路欧姆定律

全电路是指含有电源和负载的闭合回路。**全电路欧姆定律又称为闭合电路欧姆定律，其内容是：闭合电路中的电流与电源的电动势成正比，与电路的内外电阻之和成反比，**即

$$I=\frac{E}{R+R_0}$$

下面以图 1-9 所示电路来说明全电路欧姆定律。

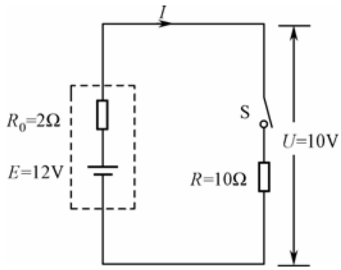


图 1-9　全电路欧姆定律说明图

图 1-9 中虚线框内为电源，R_0 表示电源的内阻，E 表示电源的电动势，当开关 S 闭合后，电路中有电流 I 流过，根据全电路欧姆定律可求得 $I=\frac{E}{R+R_0}=\frac{12}{10+2}=1A$。电源输出电压（也即电阻 R 两端的电压）$U=IR=1\times10=10V$，内阻 R_0 两端的电压 $U_0=IR_0=1\times2=2V$。如果将开关 S 断开，电路中的电流 $I=0$，那么内阻 R_0 上消耗的电压 $U_0=0V$，电源输出电压 U 与电源电动势相等，即 $U=E=12V$。

根据全电路欧姆定律不难看出：

① 在电源未接负载时，不管电源内阻多大，内阻消耗的电压始终为 0，电源两端电压与电源的电动势相等。

② 当电源与负载构成闭合电路后，由于有电流流过内阻，内阻会消耗电压，从而使电源输出电压降低，内阻越大，内阻消耗的电压越大，电源输出电压就越低。

③ 在电源内阻不变的情况下，如果外阻越小，电路中的电流就越大，内阻消耗的电压也越大，电源输出电压也会降低。

由于正常电源的内阻很小，内阻消耗的电压很低，故一般情况下可认为电源输出电压与电源电动势相等。

利用全电路欧姆定律可以解释很多现象。比如旧电池两端电压与正常电压相同，但将旧电池与电路连接后除了输出电流很小外，电池的输出电压也会急剧下降，这是因为旧电池内阻变大的缘故；又如将电源正、负极直接短路时，电源会发热甚至烧坏，这是因为短路时流过电源内阻的电流很大，内阻消耗的电压与电源电动势相等，大量的电能在电源内阻上消耗并转换成

热能，故电源会发热。

1.1.6　电功、电功率和焦耳定律

1．电功

电流流过灯泡，灯泡会发光；电流流过电炉丝，电炉丝会发热；电流流过电动机，电动机会运转。可见**电流流过一些用电设备时是会做功的，电流做的功称为电功。用电设备做功的大小不但与加到用电设备两端的电压及流过的电流有关，还与通电时间长短有关。**电功可用下面的公式计算：

$$W=UIt$$

W **表示电功，单位是焦（J）**；*U* 表示电压，单位是伏（V）；*I* 表示电流，单位是安（A）；*t* 表示时间，单位是秒（s）。

2．电功率

电流需要通过一些用电设备才能做功，为了衡量这些设备做功能力的大小，引入一个电功率的概念。**电功率是指单位时间内电流通过用电设备所做的功。电功率常用** ***P*** **表示，单位是瓦（W）**，此外还有千瓦（kW）和毫瓦（mW），它们之间的关系是：

$$1\text{kW}=10^3\text{W}=10^6\text{mW}$$

电功率的计算公式是：

$$P=UI$$

根据欧姆定律可知 $U=I\cdot R$，$I=\dfrac{U}{R}$，所以电功率还可以用公式 $P=I^2\cdot R$ 和 $P=\dfrac{U^2}{R}$ 来求解。

举例：在图 1-10 所示的电路中，灯泡两端的电压为 220V（它与电源的电动势相等），流过灯泡的电流为 0.5A，求灯泡的功率、电阻和电源在 10s 内所做的功。

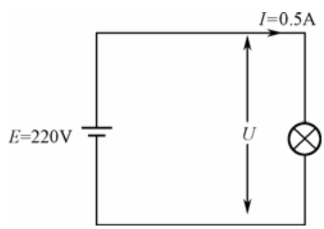


图 1-10　电功率计算例图

灯泡的功率：

$$P=UI=220\text{V}\cdot 0.5\text{A}=110\text{VA}=110\text{W}$$

灯泡的电阻：

$$R=\frac{U}{I}=\frac{220\text{V}}{0.5\text{A}}=440\Omega$$

电源在 10s 内做的功：$W=UIt=220\text{V}\times0.5\text{A}\times10\text{s}=1100\text{J}$

这里要补充一下，电功的单位是焦耳（J），但在电学中常用另一个单位：千瓦时（kWh），也称为度。1 千瓦时=1 度，千瓦时与焦耳的关系是：

$$1\text{ 千瓦时}=1\times10^3\text{ 瓦}\times(60\times60)\text{秒}=3.6\times10^6\text{ 瓦}\cdot\text{秒}=3.6\times10^6\text{ 焦}$$

1 千瓦时可以这样理解：一个电功率为 100W 的灯泡连续使用 10 个小时，消耗的电功为 1 千瓦时（即消耗 1 度电）。

3．焦耳定律

电流流过导体时导体会发热，这种现象称为电流的热效应。电热锅、电熨斗和电热水器等都是利用电流的热效应来工作的。

英国物理学家焦耳通过实验发现：**电流流过导体，导体发出的热量与导体流过的电流、导体的电阻和通电的时间有关。**这个关系用公式表示就是：

$$Q=I^2Rt$$

式中的 **Q 表示热量，单位是焦耳（J）**，R 表示电阻，单位是欧姆（Ω），t 表示时间，单位是秒（s）。

焦耳定律说明：电流流过导体产生的热量，与电流的平方、导体的电阻和通电时间均成正比。由于这个定律除了由焦耳发现外，俄国科学家楞次也通过实验独立发现，故该定律又称焦耳-楞次定律。

举例：某台电动机额定电压是 220V，线圈的电阻为 0.4Ω，当电动机接 220V 的电压时，流过的电流是 3A，求电动机的功率和线圈每秒钟发出的热量。

电动机的功率是：

$$P=U\cdot I=220\text{V}\times3\text{A}=660\text{W}$$

电动机线圈每秒钟发出的热量：

$$Q=I^2Rt=(3\text{A})^2\times0.4\Omega\times1\text{s}=3.6\text{J}$$

1.2　电阻的连接

1.2.1　电阻的串联

两个或两个以上的电阻头尾相接连在电路中，称为电阻的串联。电阻的串联如图 1-11 所示。

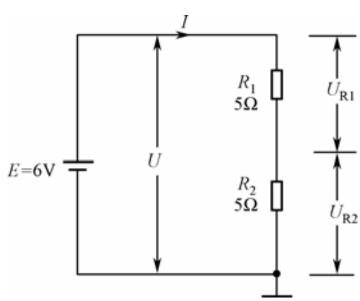


图 1-11　电阻的串联

电阻串联电路的特点有：

① **流过各串联电阻的电流相等**，都为 I；

② **电阻串联后的总电阻增大，总电阻等于各串联电阻之和**，即

$$R=R_1+R_2$$

③ **总电压等于各串联电阻上电压之和**，即

$$U=U_{R1}+U_{R2}$$

④ **电阻越大，两端电压越高**，因为 $R_1<R_2$，所以 $U_{R1}<U_{R2}$。

在如图 1-11 所示电路中，两个串联电阻上的总电压 U 等于电源的电动势，即 $U=E=6V$；电阻串联后总电阻 $R=R_1+R_2$；流过各电阻的电流 $I=U/(R_1+R_2)=6/12=0.5A$；电阻 R_1 上的电压 $U_{R1}=I \cdot R_1=0.5\times5=2.5V$，电阻 R_2 上的电压 $U_{R2}=I \cdot R_2=0.5\times7=3.5V$。

1.2.2 电阻的并联

两个或两个以上的电阻头头相连、尾尾相接接在电路中，称为电阻的并联。电阻的并联如图 1-12 所示。

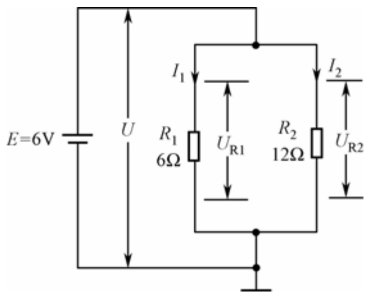


图 1-12 电阻的并联

电阻并联电路的特点有：

① **并联电阻两端的电压相等**，即

$$U_{R1}=U_{R2}$$

② **总电流等于流过各个并联电阻的电流之和**，即

$$I=I_1+I_2$$

③ **电阻并联总电阻减小，总电阻的倒数等于各并联电阻的倒数之和**，即

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}$$

该式子可变形为

$$R=\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1+R_2}$$

④ **在并联电路中，电阻越小，流过的电流越大**，因为 $R_1<R_2$，所以 $I_1>I_2$。

在如图 1-12 所示的电路中，并联的电阻 R_1、R_2 两端的电压相等，$U_{R1}=U_{R2}=U=6V$；流过 R_1 的电流 $I_1=\frac{U_{R1}}{R_1}=\frac{6}{6}=1A$，流过 R_2 的电流 $I_2=\frac{U_{R2}}{R_2}=\frac{6}{12}=0.5A$，总电流 $I=I_1+I_2=1+0.5=1.5A$；

R_1、R_2 并联后总电阻为

$$R=\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1+R_2}=\frac{6 \cdot 12}{6+12}=4\Omega$$

1.2.3　电阻的混联

一个电路中的电阻既有串联又有并联时，称为电阻的混联，如图 1-13 所示。

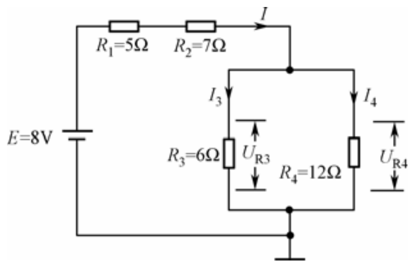


图 1-13　电阻的混联

对于电阻混联电路的总电阻可以这样求：先求并联电阻的总电阻，然后再求串联电阻与并联电阻的总电阻之和。在图 1-13 中，并联电阻 R_3、R_4 的总电阻为

$$R_0=\frac{R_3 \cdot R_4}{R_3+R_4}=\frac{6 \times 12}{6+12}=4\Omega$$

电路的总电阻

$$R=R_1+R_2+R_0=5+7+4=16\Omega$$

想想看，如何求图 1-13 中总电流 I，R_1 两端电压 U_{R1}，R_2 两端电压 U_{R2}，R_3 两端电压 U_{R3}，以及流过 R_3、R_4 的电流 I_3、I_4 的大小。

1.3　电 磁 知 识

1.3.1　磁铁与磁性材料

1．磁铁

将一块磁铁靠近铁钉，会发现磁铁即使没有接触到铁钉，也会把铁钉吸引过来，如图 1-14 所示。磁铁没有接触铁钉就可以将它吸引过来，这是因为磁铁能产生磁场，是磁场产生的作用力将铁钉“拉”过来的。

任何一块磁铁都有 N 极、S 极两个磁极。由于磁铁产生的磁场人眼看不见，但实际上又存在，**为了表示磁场强弱和方向，常在磁铁周围画一些带箭头的闭合线条，这些线条称为磁感线（或称磁力线）**，如图 1-15 所示，**磁感线的疏密表示磁场的强弱，磁感线上的箭头表示磁场的方向。**从图中可以看出，磁铁 N、S 极两端出来和进入的磁感线最多，所以磁铁两端的磁场最强，磁感线箭头的方向在磁铁外部是由磁铁的 N 极出来，S 极进入（在磁铁内部则相反）。

另外，**磁场具有同极性相吸引、异极性相排斥的性质。**



图 1-14　磁铁吸引铁钉

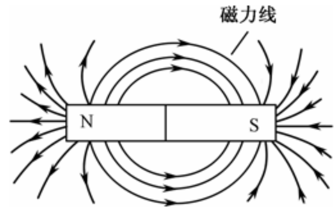


图 1-15　磁铁周围的磁感线

2．磁性材料

如果将一根不带磁性的钢棒接触磁铁，会发现先前不带磁性的钢棒现在也可以吸引铁钉，如图 1-16 所示。此时再移开磁铁，钢棒还能吸引铁钉，也就是说，磁铁接触钢棒，使钢棒也具有了磁性。

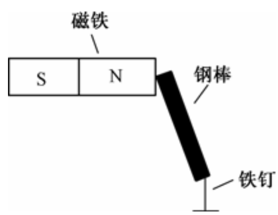


图 1-16　磁化的钢棒吸引铁钉

不带磁性的物质在磁场的作用下带上磁性的现象称为磁化现象，这种在磁场作用下能带上磁性的物质称为磁性材料。**磁性材料可分为软磁性材料和硬磁性材料。**

（1）软磁性材料

软磁性材料在外部磁场作用下，容易被磁化而带磁性，外部磁场消失后，其所带的磁性会随之消失，剩磁很少。常见的软磁性材料有纯铁、硅钢、坡莫合金、锰锌铁氧体和镍锌铁氧体等。软磁性材料常用在变压器、电动机、发电机、接触器、继电器，以及录音机和摄录像机的磁头中。

（2）硬磁性材料

硬磁性材料在外部磁场的作用下，容易被磁化而带磁性，外部磁场消失后，其磁性不容易消失，还会保留较强的剩磁。常见的硬磁性材料有二氧化铬、三氧化二铁、铁钴合金和钕铁硼合金等。硬磁性材料常用在电工仪表、高效能电动机和一些磁记录设备中。

1.3.2　通电导体产生的磁场

先来按图 1-17 所示的方法做一个实验，在一根不带磁性的铁棒上缠绕多匝线圈（匝数越多越好），再在线圈的引出线上接好开关和电池，在铁棒下方放一个小铁钉。在闭合开关时，铁钉马上被铁棒吸引过来，断开开关，铁钉又会掉下来。这个实验说明，通电线圈也会产生磁场，线圈产生的磁场将铁棒磁化，使之带磁，带上磁性的铁棒可以吸引铁钉。

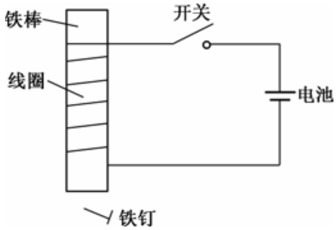


图 1-17　通电线圈产生磁场

通电导体能产生磁场，该磁场与磁铁产生的磁场一样，都具有大小和方向，通过导体的电流方向变化，导体产生的磁场方向也会变化。下面来分析两种形式通电导体的电流与其产生磁场的关系。

1．通电螺旋管导体的电流与磁场关系

在图 1-17 中，绕在铁棒上的线圈呈螺旋状，通常将这种形状的导体称为螺旋管导体。**对于通电螺旋管导体，它产生磁场的方向与通过电流的方向可用右手螺旋定则来判断。**右手螺旋定则使用方法如图 1-18 所示，用右手四指握住螺旋管，四指的弯曲方向与环形电流方向一致，让大拇指伸直，大拇指所指的方向就是螺旋管产生的磁场磁感线方向。读者可以试着用该方法来分析图 1-17 中线圈产生的磁场磁感线方向。

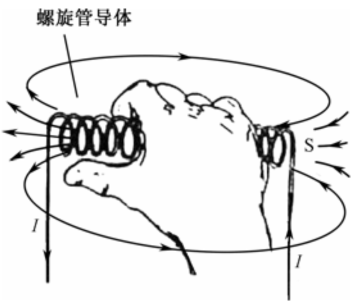


图 1-18　用右手螺旋定则判断通电螺旋管导体的磁场方向

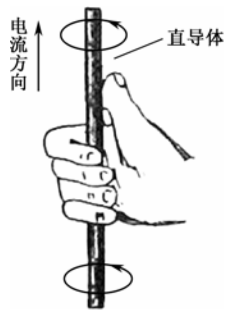


图 1-19　用右手螺旋定则判断通电直导体的磁场方向

2．通电直导体的电流与磁场关系

对于通电直导体，它产生磁场的方向与通过电流的关系也可以用右手螺旋定则来判断。如图 1-19 所示，用右手四指握住直导体，让伸直的大拇指所指方向与电流的方向一致，弯曲的四指所指方向就是直导体产生的磁场磁感线方向。

1.3.3　通电导体在磁场中受到的力

通电导体会产生磁场，若将通电导体放在其他磁场中（如磁铁产生的磁场），通电导体产生的磁场与其他的磁场就会产生吸引或排斥，从而使通电导体受到作用力。**通电导体在磁场中受到的力称为安培力。**

安培力的方向可用左手定则来判断。左手定则使用方法如图 1-20 所示，伸开左手手掌，让大拇指和其余四指垂直，并且和手掌都在同一平面内，把手掌伸入磁场中，让磁感线垂直穿

过手掌，同时让四指指向导体的电流方向，那么大拇指所指的方向就是通电导体在磁场中所受安培力的方向。

导体在磁场中所受安培力的大小与磁感应强度 *B*、导体流过的电流 *I* 和导体的长度有关。 导体在磁场中受到的安培力可用下面的式子来计算：

$$F=BIL\sin\alpha$$

F 为安培力（单位：N）；*B* 为磁感应强度（单位：T），它表示磁场中各点磁场的强弱和方向，其大小用该点磁感线的疏密来表示，某点磁感线越密，则该点的磁感应强度越大。如果磁场中各点的磁场强弱相同，那么该磁场为匀强磁场，匀强磁场中各点磁感应强度是相同的，磁感应强度的方向与磁场方向相同；*L* 为导体的长度（单位：m）；*I* 为导体通过的电流（单位：A）；α为导体与磁场的夹角（如图 1-21 所示），如果通电导体与磁场垂直，即α=90°，那么通电导体在磁场受到的安培力 *F=BIL*。

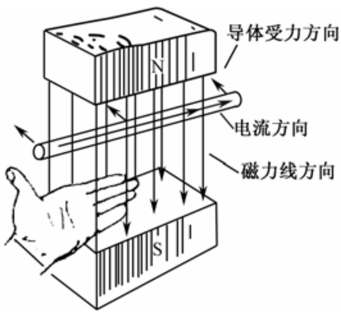


图 1-20　用左手定则判断通电导体在磁场中的受力方向

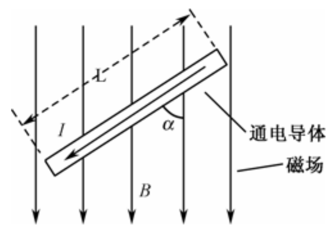


图 1-21　导体与磁场的夹角

1.3.4　电磁感应

电流可以产生磁场，反过来也可以利用磁场产生电流。**当闭合电路的部分导体在磁场中切割磁感线，或者穿过闭合电路的磁感线数量（又称磁通量）发生变化时，闭合回路中就有电流产生，这种现象称为电磁感应现象。**

1．导体在切割磁感线时会产生电流

当闭合电路的部分导体切割磁感线时，在导体中就有电动势产生，电路中就有电流形成。 如图 1-22 所示，将与电流表连接在一起的导体放在磁场中，当导体在磁场中做切割磁场磁感线运动时，导体中马上有电动势产生，此时的导体就相当于一个电源，它会输出电流流过电流表，电流表表针摆动。

导体产生的电动势方向（也即导体产生的电流方向）与导体的运动方向、磁场的方向有关。导体产生电动势的方向可以用右手定则来判断。 右手定则使用如图 1-22 所示，伸开右手，让拇指和四指垂直并且在同一平面内，将右手掌放入磁场中，让磁感线垂直穿过掌心，拇指指向导体运动的方向，四指所指的方向就是导体产生电动势的方向，也是导体产生电流的方向。

在图 1-22 中，如果导体不动，而让磁场运动，导体也会切割磁感线，导体中也会有电动势产生。在这种情况下判断导体电动势方向时，应将磁场运动的相反方向看做导体的运动方向，如磁场往左运动可以看成是磁场不动而导体往右运动，再用右手定则来分析导体产生的电动势方向。

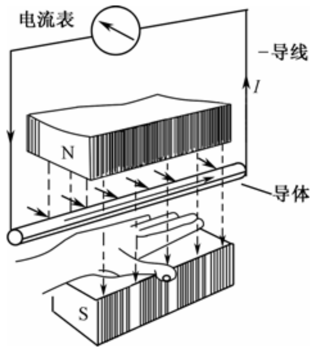


图 1-22　导体切割磁感线产生电流与右手定则的使用

导体在磁场中切割磁感线时会产生电动势，计算电动势大小的式子为：

$$E=BLV\sin\alpha$$

E 为电动势（单位：V）；B 为磁感应强度（单位：T）；L 为导体的长度（单位：m）；V 为导体在磁场中的运动速度（单位：m/s）；α为导体与磁场的夹角。

2．闭合电路在磁通量变化时会产生电流

为了说明闭合电路磁通量变化能产生电流，先按如图 1-23 所示方法做一个实验。将线圈与一个电流表连接起来，然后拿一块磁铁靠近线圈，在磁铁插入线圈过程中，电流表表针会摆动，说明线圈有电流产生，当磁铁插在线圈中不动时，表针不动，说明线圈没有电流产生，当突然拔出磁铁时，表针又发生摆动，说明线圈又有电流产生，但表针此刻摆动方向与插入磁铁时表针摆动方向相反。

在这个实验中，当插入磁铁时，穿过线圈的磁感线数量增大（即磁通量增大），当拔出磁铁时，穿过线圈的磁感线数量减小（即磁通量减小），线圈中都有电流产生，而磁铁在线圈中不动时，穿过线圈的磁感线数量不变（即磁通量不变），线圈中没有电流产生。因此可以得出这样的结论：**当穿过线圈的磁通量发生变化时，线圈会产生电动势，当线圈与其他元件组成闭合电路时，线圈中就有电流产生。**

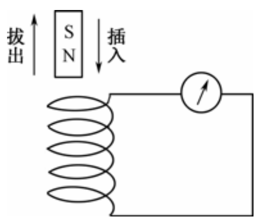


图 1-23　闭合导体磁场量发生变化时会产生电流的实验

线圈产生的电动势方向与穿过线圈的磁通量有关，它们之间的关系可以用楞次定律来判断。楞次定律指出，闭合线圈产生的感应电流具有这样的方向：感应电流产生的磁场总是要阻碍引起感应电流的磁通量的变化。具体来说，当穿过线圈的磁通量增大时，线圈产生的感应电流所形成的磁场要阻碍磁通量增大；当穿过线圈的磁通量减小时，线圈产生的感应电流所形成的磁场要阻碍磁通量减小。

利用楞次定律判断线圈产生的感应电流方向的过程是：先判断穿过线圈磁通量的方向及变化趋势（即是增大还是减小），再根据感应电流的磁场方向总是阻碍磁通量变化的原则，来确定感应电流的方向。下面以如图 1-24 所示的两种情况来具体说明。

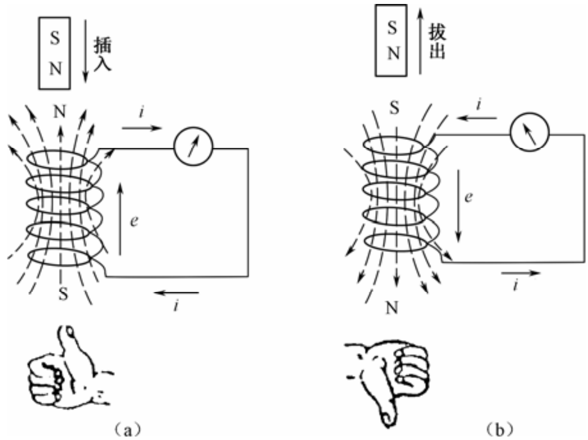


图 1-24　用楞次定律判断线圈产生的感应电流方向

在图 1- 24（a）中，穿过线圈的磁通量方向是下 N 上 S，并且磁通量具有增大的趋势，根据感应电流产生的磁场方向总是阻碍磁通量变化，确定线圈产生的磁场应是上 N 下 S，因为只有线圈产生上 N 下 S 的磁场才能阻碍从上至下且增大的下 N 上 S 的磁通量（可理解为同性相斥，线圈产生的上 N 下 S 磁场阻碍下 N 上 S 的磁铁靠近），确定线圈产生的磁场方向后，再应用右手螺旋定则不难判断出线圈的感应电流方向是由下往上的。

在图 1-24（b）中，穿过线圈的磁通量方向是下 N 上 S，并且磁通量具有减小的趋势，根据感应电流的磁场方向总是阻碍磁通量变化，确定线圈产生的磁场应是上 S 下 N，因为只有线圈产生上 S 下 N 的磁场才能阻碍从下往上且减小的下 N 上 S 的磁通量（可理解为异性相吸，线圈产生的上 S 下 N 的磁场吸引下 N 上 S 的磁铁，阻碍其离开），确定线圈产生的磁场方向后，再应用右手螺旋定则不难判断出线圈的感应电流方向是由上往下的。

线圈产生的感应电动势大小可用法拉第电磁感应定律来计算。法拉第电磁感应定律指出：闭合线圈中感应电动势的大小与穿过回路的磁通量的变化率成正比，用式子表示就是：

$$E = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

式中，E 为电动势，N 为线圈的匝数，$\Delta\Phi$表示磁通量的变化量，Δt 表示磁通量变化$\Delta\Phi$所需的时间，“–”反映感应电动势的方向。

1.4　直流电与交流电

1.4.1　直流电

直流电是指方向始终固定不变的电压或电流。能产生直流电的电源称为直流电源，常见

的干电池、蓄电池和直流发电机等都是直流电源，直流电源常用如图 1-25（a）所示的符号表示。**直流电的电流方向总是由电源正极输出，再通过电路流到负极**。在如图 1-25（b）所示的直流电路中，电流从直流电源正极流出，经电阻 R 和灯泡流到负极结束。

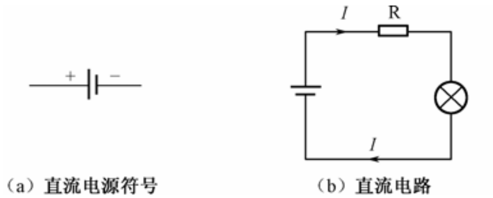


图 1-25　直流电符号及电路

直流电又分为稳定直流电和脉动直流电。

1．稳定直流电

稳定直流电是指方向固定不变并且大小也不变的直流电。稳定直流电如图 1-26（a）所示，稳定直流电的电流 I 的大小始终保持恒定（始终为 6mA），在图中用直线表示；直流电的电流方向保持不变，始终是从电源正极流向负极，图中的直线始终在 t 轴上方，表示电流的方向始终不变。

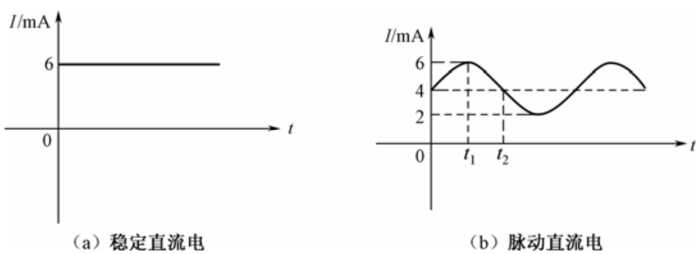


图 1-26　两种类型的直流电

2．脉动直流电

脉动直流电是指方向固定不变，但大小随时间变化的直流电。脉动直流电如图 1-26（b）所示，从图中可以看出，脉动直流电的电流 I 的大小随时间做波动变化（如在 t_1 时刻电流为 6mA，在 t_2 时刻电流变为 4mA），电流大小波动变化在图中用曲线表示；脉动直流电的方向始终不变（电流始终从电源正极流向负极），图中的曲线始终在 t 轴上方，表示电流的方向始终不变。

1.4.2　交流电

交流电是指方向和大小都随时间做周期性变化的电压或电流。交流电类型很多，其中最常见的是正弦交流电，因此这里就以正弦交流电为例来介绍交流电。

1．正弦交流电

正弦交流电的符号、波形和电路如图 1-27 所示。

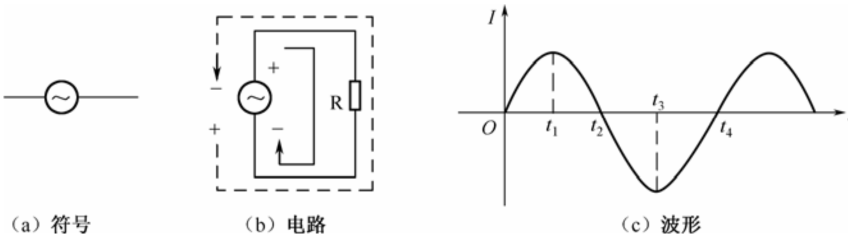


图 1-27　正弦交流电

下面以图 1-27（b）所示的交流电路来说明如图 1-27（c）所示交流电的波形。

① 在 0～t_1 期间：交流电源的极性是上正下负，电流 I 的方向是：交流电源上正→电阻 R→交流电源下负，并且电流 I 逐渐增大，电流逐渐增大在图（c）中用波形逐渐上升表示，t_1 时刻电流达到最大值。

② 在 t_1～t_2 期间：交流电源的极性仍是上正下负，电流 I 的方向仍是从交流电源上正→电阻 R→交流电源下负，电流 I 逐渐减小，电流逐渐减小在图（c）中用波形逐渐下降表示，t_2 时刻电流为 0。

③ 在 t_2～t_3 期间：交流电源的极性变为上负下正，电流 I 的方向也发生改变，图（c）中的交流电波形由 t 轴上方转到下方表示电流方向发生改变，电流 I 的方向是：交流电源下正→电阻 R→交流电源上负，电流反方向逐渐增大，t_3 时刻反方向的电流达到最大值。

④ 在 t_3～t_4 期间：交流电源的极性为上负下正，电流仍是反方向，电流的方向是由交流电源下正→电阻 R→交流电源上负，电流反方向逐渐减小，t_4 时刻电流减小到 0。

t_4 时刻以后，电流大小和方向变化与 0～t_4 期间变化相同。上述交流电源的电流呈正弦波状变化，故称为正弦交流电，其电压也按正弦波状变化，即正弦交流电电压和电流的大小和方向都随时间作周期性变化。

2．周期和频率

周期和频率是交流电中最常用的两个概念，下面以图 1-28 所示的交流电波形图来说明。

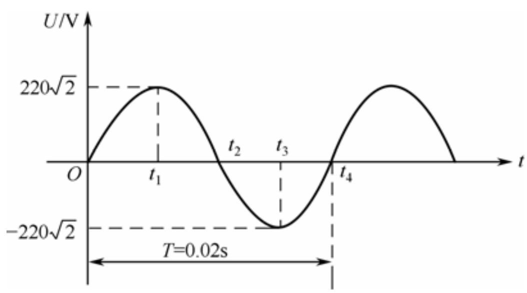


图 1-28　交流电的周期、频率和瞬时值

（1）周期

从图 1-28 可以看出，交流电变化过程是不断重复的，**交流电重复变化一次所需要的时间称为周期，周期用 T 表示，单位是秒（s）。**如图 1-28 所示交流电的周期为 T=0.02s，说明该交流电每隔 0.02s 就会重复变化一次。

（2）频率

交流电在每秒钟内重复变化的次数称为频率，频率用 f 表示，它是周期的倒数，即

$$f=\frac{1}{T}$$

频率的单位是赫兹（Hz）。如图 1-28 所示交流电的周期 T=0.02s，那么它的频率 $f=\frac{1}{T}=\frac{1}{0.02}$=50Hz。该交流电的频率 f=50Hz，说明在一秒钟内交流电能重复 0～t_4 这个过程 50 次。交流电变化越快，变化一次所需要的时间越短，周期就越短，频率也越高。

3．瞬时值和有效值

（1）瞬时值

交流电的大小和方向是不断变化的，**交流电在某一时刻的值称为交流电在该时刻的瞬时值**。以图 1-28 所示的交流电为例，它在 t_1 时刻的瞬时值为 $220\sqrt{2}$（约为 311V），该值为最大瞬时值，在 t_2 时刻瞬时值为 0V，该值为最小瞬时值。

（2）有效值

交流电的大小和方向是不断变化的，这给电路计算和测量带来不便，为此引入有效值。下面以图 1-29 所示电路来说明有效值的含义。

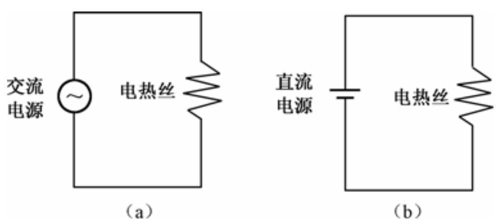


图 1-29　交流电有效值说明图

图 1-29 中两个电路中的电热丝完全一样，现分别给电热丝通交流电和直流电，如果两电路通电时间相同，并且电热丝发出的热量也相同，对电热丝来说，这里的交流电和直流电是等效的，那么图（b）直流电源的电压值、电流值分别就称为图（a）交流电源的有效电压值和有效电流值。

交流市电电压为 220V 指的就是有效值，其含义就是虽然交流电压时刻变化，但它的效果与 220V 直流电是一样的。如果没特别说明，交流电的大小通常是指有效值，测量仪表的测量值一般也是指有效值。正弦交流电的有效值与瞬时最大值的关系是：最大瞬时值=$\sqrt{2}$×有效值，如交流市电的有效电压值为 220V，它的最大瞬时电压值=$220\sqrt{2}$ V≈311V。

4．相位与相位差

（1）相位

正弦交流电的电压或电流值变化规律与正弦波一样，为了分析方便，将正弦交流电放在如图 1-30 所示的坐标中。

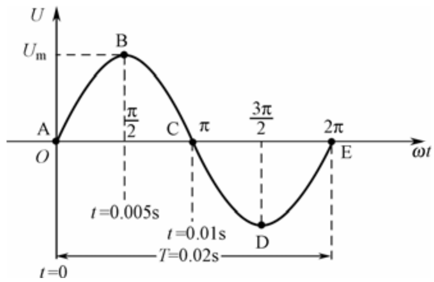


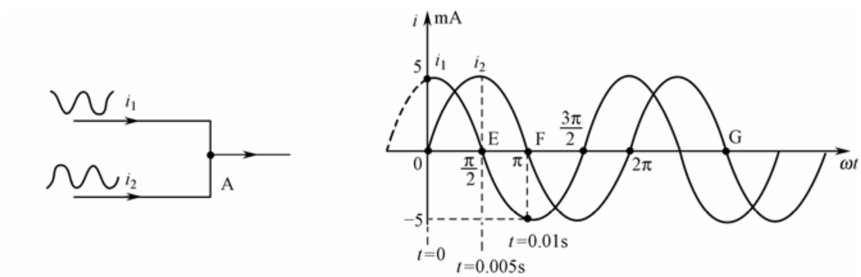
图 1-30　坐标中的正弦交流电

图中画出了交流电的一个周期，一个周期的角度为 2π，一个周期的时间为 T=0.02s。从图中可以看出，在不同的时刻，交流电压所处的角度不同，如在 t=0 时刻的角度为 0，在 t=0.005s 时刻的角度为 $\frac{\pi}{2}$，在 t=0.01s 时刻的角度为π。

交流电在某时刻的角度称为交流电在该时刻的相位。如图 1-30 所示中的交流电在 t=0.005s 时刻的相位为 $\frac{\pi}{2}$（或 90°），在 t=0.01s 时刻的相位为π（或 180°）。交流电在 t=0 时刻的角度称为交流电的初相位，图 1-30 中的交流电初相位为 0。

（2）相位差

相位差是指两个同频率交流电的相位之差。如图 1-31（a）、（b）所示，两个同频率的交流电流 i_1、i_2 分别从两条线路流向 A 点，在同一时刻，到达 A 点的 i_1、i_2 交流电流的相位并不相同，即两个交流信号存在相位差。



（a）电路中存在相位差的两个交流电　　（b）坐标中存在相位差的两个交流电

图 1-31　交流电相位差说明

在 t=0 时刻，i_1 的相位为 $\frac{\pi}{2}$，而 i_2 的相位为 0，在 t=0.01s 时，i_1 的相位为 $\frac{3\pi}{2}$，而 i_2 的相位为π，两个电流的相位差为 $\frac{\pi}{2}-0=\frac{\pi}{2}$ 或（$\frac{3\pi}{2}-\pi$）$=\frac{\pi}{2}$，即 i_1、i_2 的相位差始终是 $\frac{\pi}{2}$。在图 1-31（b）中，若将 i_1 的前一段补充出来，也可以看出 i_1、i_2 的相位差是 $\frac{\pi}{2}$，并且 i_1 超前 i_2，超前 $\frac{\pi}{2}$（或称为超前 90°）。

两个交流电存在相位差实际上就是两个交流电变化存在着时间差。例如图 1-31（b）中的两个交流电，在 t=0 时刻 i_1 电流的值为 5mA，i_2 电流的值为 0；而到 t=0.005s 时，i_1 电流的值

变为 0，i_2 电流的值变为 5mA；也就是说，i_2 电流变化总是滞后 i_1 电流的变化。

若要在坐标图上区分两个交流电的相位差，可取两个交流电在 t 轴上性质相同的点（两个点的变化趋势相同），要求两点间的相角差不能超过 2π，两点之间的相角差即为两交流电的相位差，点在左方的交流电相位超前。图 1-31 中 E、F 点分别为 i_1、i_2 在 t 轴上性质相同的点（虽然 E、G 点性质也相同，但它们之间的相角差超过 2π），E、F 点之间的相角差为$\pi-\frac{\pi}{2}=\frac{\pi}{2}$，则 i_1、i_2 的相位差为$\frac{\pi}{2}$，E 点在 F 点的左方，故 i_1 相位超前 i_2。

1.5 三相交流电的产生与供电方式

1.5.1　三相交流电的产生

目前应用的电能绝大多数是由三相发电机产生的，**三相发电机与单相发电机的区别在于：三相发电机可以同时产生并输出三组电源，而单相发电机只能输出一组电源**，因此三相发电机效率较单相发电机更高。

三相交流发电机的结构示意图如图 1-32 所示。

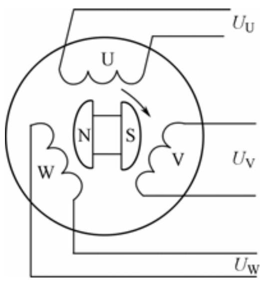


图 1-32　三相交流发电机的结构示意图

从图中可以看出，三相发电机主要是由互成 120°且固定不动的 U、V、W 三组线圈和一块旋转磁铁组成。当磁铁旋转时，磁铁产生的磁场切割这三组线圈，在 U、V、W 三组线圈中会分别产生交流电动势，各线圈两端就分别输出交流电压 U_U、U_V、U_W，这三组线圈输出的三组交流电压称做三相交流电压。一些常见的三相交流发电机每相交流电压大小为 220V。

不管磁铁旋转到哪个位置，穿过三组绕圈的磁力线都会不同，所以三组线圈产生的交流电压也就不同。三相交流发电机产生的三相交流电波形如图 1-33 所示。

从图中可以看出，U_U、U_V、U_W 三相交流电压的相位都不相同，在三个电压上取性质相同且相邻的 A、B、C 三个点，三个点之间相差的角度都是 120°，即这三个交流电压相位差都是 120°，它们在任意时刻 t 的电压值可分别用下面的表达式来求解；

$$U_U=U_m\sin\omega t$$

$$U_V=U_m\sin(\omega t-120°)$$

$$U_W=U_m\sin(\omega t-240°)$$

式中的 U_m 为交流电压最大值，ω为角频率，它与交流电压频率 f 的关系是：$\omega=2\pi f$。

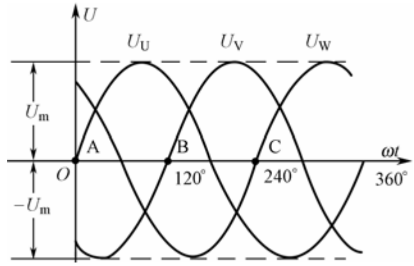


图 1-33　三相交流电的波形

1.5.2　三相交流电的供电方式

三相交流发电机能产生三相交流电压，将这三相交流电压供给用户可采用三种方式：直接连接供电、星形连接供电和三角形连接供电。

（1）直接连接供电方式

直接连接供电方式如图 1-34 所示。

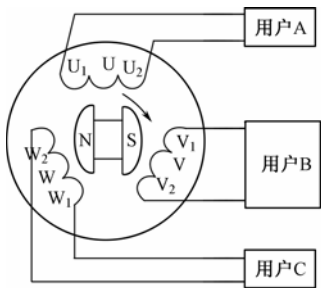


图 1-34　直接连接供电方式

直接连接供电方式是将发电机三组线圈输出的每相交流电压分别用 2 根导线向用户供电，这种方式共需用到 6 根供电导线，如果长距离供电时采用这种供电方式会使供电线路成本很高。

（2）星形连接供电方式

星形连接供电方式如图 1-35 所示。

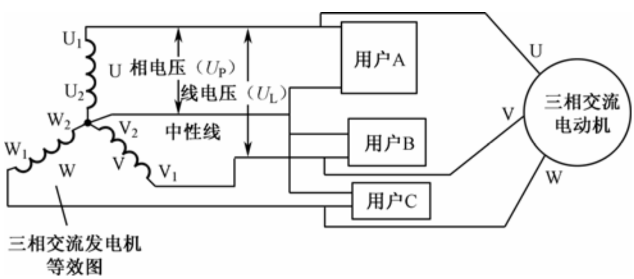


图 1-35　星形连接供电方式

星形连接是将发电机的三组线圈末端都连接在一起，并接出一根线，称为中性线 N，三组线圈的首端各引出一根线，称为相线，这三根相线分别称做 U 相线、V 相线和 W 相线。三根相线分别连接到单独的用户，而中性线则在用户端一分为三，同时连接三个用户，这样发电机三组线圈上的电压就分别提供给各自的用户。**在这种供电方式中，发电机三组线圈连接呈星形，并且采用四根线来传送三相电压，故称做三相四线制星形连接供电方式。**

任意一根相线与中性线之间的电压都称为相电压 U_P，该电压实际上是任意一组线圈两端的电压；**任意两根相线之间的电压称为线电压 U_L。**从图 1-35 中可以看出，线电压实际上是两组线圈上相电压叠加得到的，但线电压 U_L 的值并不是相电压 U_P 的 2 倍，因为任意两组线圈上的相电压相位都不相同，不能进行简单的乘 2 来求得。**根据理论推导可知，在星形连接时，线电压是相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，即**

$$U_L=\sqrt{3}\,U_P$$

如果相电压 U_P=220V，根据上式可计算出线电压约为 380V。在图 1-35 中，三相交流电动机的三根线分别与发电机的三根相线连接，若发电机的相电压为 220V，那么电动机三根线中的任意两根之间的电压就为 380V。

（3）三角形连接供电方式

三角形连接供电方式如图 1-36 所示。

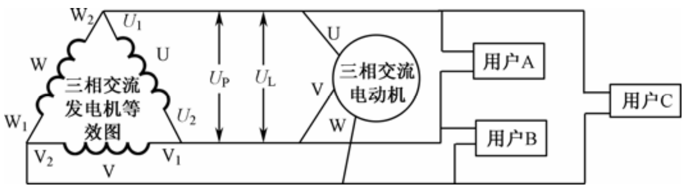


图 1-36　三角形连接供电方式

三角形连接是将发电机的三组线圈首末端依次连接在一起，连接方式呈三角形，在三个连接点各接出一根线，分别称为 U 相线、V 相线和 W 相线。将三根相线按图 1-36 所示的方式与用户连接，三组线圈上的电压就分别提供给各自的用户。**在这种供电方式中，发电机三组线圈连接呈三角形，并且采用三根线来传送三相电压，故称为三相三线制三角形连接供电方式。**

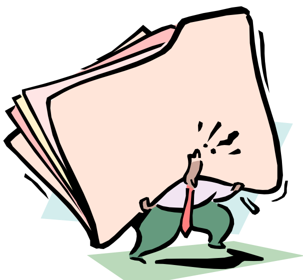
在三角形连接方式中，相电压 U_P（每组线圈上的电压）和线电压 U_L（两根相线之间的电压）是相等的，即

$$U_L=U_P$$

在图 1-36 中，如果相电压为 220V，那么电动机三根线中的任意两根之间的电压也为 220V。

第 2 章

常用电工仪表的使用



问：老师，常用的电工仪表有哪些？分别用来测量什么呢？

答：常用的电工仪表有万用表、电度表、钳形表和兆欧表等，主要用来测量电压、电流、电阻、用电量和绝缘电阻等。



2.1 指针万用表

指针万用表是一种广泛使用的电子电工测量仪表，它由一只灵敏度很高的直流电流表（微安表）作表头，再加上挡位选择开关和相关的电路组成。指针万用表可以测量电压、电流、电阻的值，还可以测量电子元器件的好坏。指针万用表种类很多，使用方法都大同小异，本节以 MF-47 型万用表为例进行介绍。

2.1.1 面板介绍

MF-47 型万用表的面板如图 2-1 所示。从面板上可以看出，**指针万用表面板主要由刻度盘、挡位选择开关、旋钮和插孔构成。**

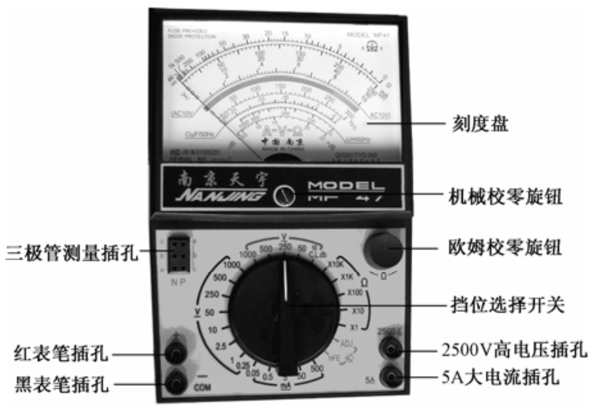


图 2-1　MF-47 型万用表的面板

1．刻度盘

刻度盘用来指示被测量值的大小，它由 1 根表针和 7 条刻度线组成。刻度盘如图 2-2 所示。

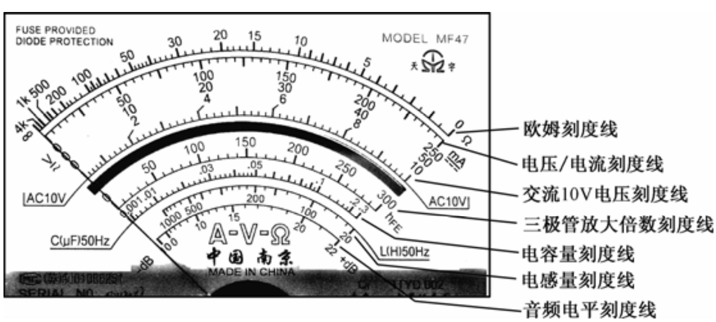


图 2-2　刻度盘

第 1 条标有“Ω”字样的为欧姆刻度线。在测量电阻阻值时查看该刻度线。这条刻度线最右端刻度表示的阻值最小，为 0，最左端刻度表示的阻值最大，为∞（无穷大）。在未测量时

表针指在左端无穷大处。

第 2 条标有“V”（左方）和“mA”（右方）字样的为直、交流电压/电流刻度线。在测量直流电压、电流和交流电压、电流时都查看这条刻度线。该刻度线最左端刻度表示最小值，最右端刻度表示最大值，在该刻度线下方标有三组数，它们的最大值分别是 250、50 和 10。当选择不同挡位时，要将刻度线的最大刻度看做该挡位最大量程数值（其他刻度也要相应变化）。如挡位选择开关置于“50V”挡测量时，表针指在第 2 刻度线最大刻度处，表示此时测量的电压值为 50V（而不是 10V 或 250V）。

第 3 条标有“AC10V”字样的为交流 10V 挡专用刻度线。在挡位开关置于交流 10V 挡测量时，查看该刻度线。

第 4 条标有“hFE”字样的为三极管放大倍数刻度线。在测量三极管放大倍数时查看这条刻度线。

第 5 条标有“C（μF）”字样的为容量刻度线。在测量电容容量时查看这条刻度线。

第 6 条标有“L（H）”字样的为电感量刻度线。在测量电感的电感量时查看该刻度线。

第 7 条标有“dB”字样的为音频电平刻度线。在测量音频信号电平时查看这条刻度线。

2. 挡位选择开关

挡位选择开关的功能是选择不同的测量挡位。挡位选择开关如图 2-3 所示。



图 2-3　挡位选择开关

3. 旋钮

万用表面板上有 2 个旋钮：机械校零旋钮和欧姆校零旋钮，如图 2-1 所示。

机械校零旋钮的功能是在测量前将表针调到电压/电流刻度线的“0”刻度处。欧姆校零旋钮的功能是在使用欧姆挡测量时，将表针调到欧姆刻度线的“0”刻度处。两个旋钮的详细调节方法在后面将会介绍。

4. 插孔

万用表面板上有 4 个独立插孔和一个 6 孔组合插孔，如图 2-1 所示。

标有“+”字样的为红表笔插孔；标有“−”（或 COM）字样的为黑表笔插孔；标有“5A”字样的为大电流插孔，当测量 500mA～5A 范围内的电流时，红表笔应插入该插孔；标有“2500V”字样的为高电压插孔，当测量 1000～2500V 范围内的电压时，红表笔应插入此插孔。

6 孔组合插孔为三极管测量插孔，标有“N”字样的 3 个孔为 NPN 三极管的测量插孔，标有“P ”字样的 3 个孔为 PNP 三极管的测量插孔。

2.1.2　使用前的准备工作

指针万用表在使用前，需要安装电池、机械校零和安插表笔。

1. 安装电池

在使用万用表测量前，需要在内部安装电池，若不安装电池，欧姆挡和三极管放大倍数挡将无法使用，但电压、电流挡仍可使用。MF-47 型万用表需要 9V 和 1.5V 两个电池，其中 9V 电池供给 R×10kΩ使用，1.5V 电池供给 R×10kΩ挡以外的欧姆挡和三极管放大倍数测量挡使用。

万用表电池的安装如图 2-4 所示。安装电池时，一定要注意电池的极性不能装错。



图 2-4　安装万用表的电池

2. 机械校零

在出厂时，大多数厂家已对万用表进行了机械校零，若某些原因造成表针未调零时，可自己进行机械调零。机械调零过程如图 2-5 所示。

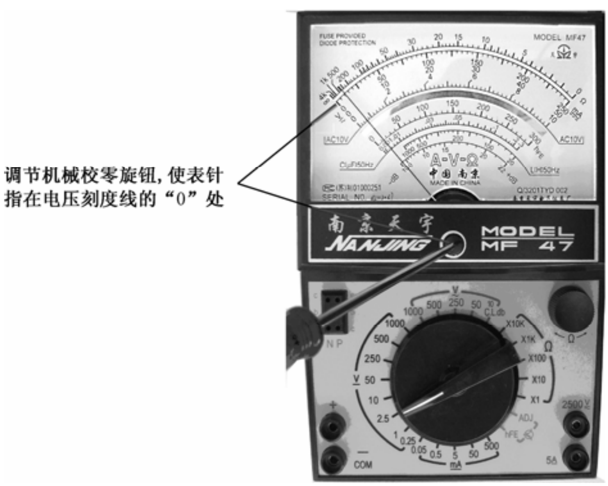


图 2-5　机械校零

3．安装表笔

万用表有红、黑两根表笔，在测量时，红表笔要插入标有“+”字样的插孔，黑表笔要插入标有“–”字样的插孔。

2.1.3　测量直流电压

MF-47 型万用表的直流电压挡具体又分为 0.25V、1V、2.5V、10V、50V、250V、500V 、1000V 和 2500V 挡。

下面通过测量一节干电池的电压值来说明直流电压的测量，测量如图 2-6 所示，具体过程如下。

第一步：选择挡位。**测量前先估计被测电压可能的最大值，再根据挡位应高于且最接近被测电压的原则选择挡位，若无法估计，可先选最高挡测量，再根据测量值重新选取合适低挡位测量。**一节干电池的电压一般在 1.5V 左右，根据挡位应高于且最接近被测电压的原则，选择 2.5V 挡最为合适。

第二步：红、黑表笔接被测电压。**红表笔接被测电压的高电位处（即电池的正极），黑表笔接被测电压的低电位处（即电池的负极）。**

第三步：读数。在刻度盘上找到旁边标有“V”字样的刻度线（即第 2 条刻度线），该刻度线有最大值分别是 250、50、10 的三组数对应，因为测量时选择的挡位为 2.5V，所以选择最大值为 250 的那一组数进行读数，但需将 250 看成 2.5，该组其他数做相应的变化。现观察表针指在接近 150 的位置，约为 145，那么被测电池的直流电压大小约为 1.45V。

补充说明：

① 如果测量 1000～2500V 范围内的电压时，挡位选择开关应置于 1000V 挡位，红表笔要插在 2500V 专用插孔中，黑表笔仍插在“–”插孔中，读数时选择最大值为 250 的那一组数。

② 直流电压 0.25V 挡与直流电流 0.05mA 挡是公用的，在测直流电压选择该挡时，可以测量 0～0.25V 范围内的电压，读数时选择最大值为 250 的那一组数，在测直流电流时选择该挡可以测量 0～0.05mA 范围内的电流，读数时选择最大值为 50 的那一组数。



图 2-6　直流电压的测量

2.1.4　测量交流电压

MF-47 型万用表的交流电压挡具体又分为 10V、50V、250V、500V 、1000V 和 2500V 挡。下面通过测量市电电压的大小来说明交流电压的测量，测量如图 2-7 所示，具体过程如下。

第一步：选择挡位。市电电压一般在 220V 左右，根据挡位应高于且最接近被测电压的原则，选择 250V 挡最为合适。

第二步：红、黑表笔接被测电压。**由于交流电压无正、负极性之分，故红、黑表笔可随意分别插在市电插座的两个插孔中。**

第三步：读数。交流电压与直流电压共用刻度线，读数方法也相同。因为测量时选择的挡位为 250V，所以选择最大值为 250 的那一组数进行读数。现观察表针指在刻度线 230 的位置，那么被测市电电压的大小为 230V。

注意：在选用 10V 交流挡测量时，需要查看标有“AC10V”字样的刻度线。

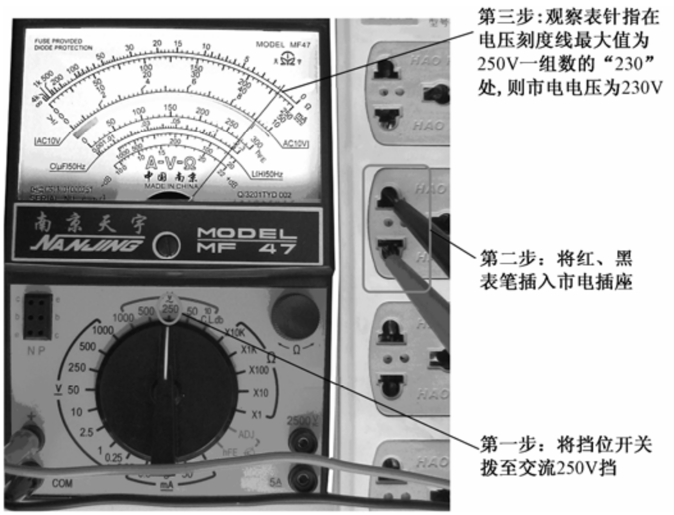


图 2-7　交流电压的测量

2.1.5　测量直流电流

MF-47 型万用表的直流电流挡具体又分为 0.05mA、0.5mA、5mA、50mA 、500mA 和 5A 挡。

下面以测量图 2-8（a）电路中流过灯泡的电流大小来说明直流电流的测量，其测量等效图如图 2-8（b）所示。测量流过灯泡的电流的具体过程如下。

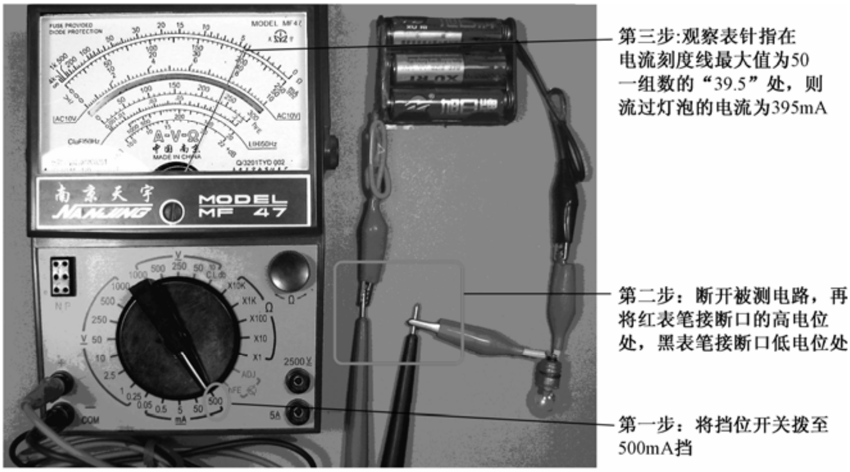
第一步：选择挡位。灯泡工作电流较大，这里选择直流 500mA 挡。

第二步：测量电流时需断开被测电路，将万用表红、黑表笔串接在被测电路的断开处，红表笔接断开处的高电位端，黑表笔接断口处的另一端。

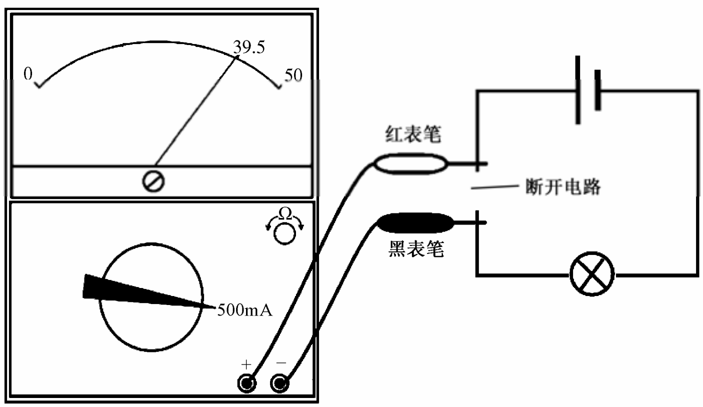
第三步：读数。直流电流与直流电压共用刻度线，读数方法也相同。因为测量时选择的挡位为 500mA 挡，所以选择最大值为 50 的那一组数进行读数。现观察表针指在刻度线接近 40 的位置，约 39.5，那么流过灯泡的电流为 395mA。

如果流过灯泡的电流大于 500mA，可将红表笔插入 5A 插孔，挡位仍置于 500mA 挡。

注意：测量电路的电流时，一定要断开电路，并将万用表串接在电路断开处，这样电路中的电流才能流过万用表，万用表才能指示被测电流的大小。



（a）测量图



（b）等效图

图 2-8　直流电流的测量

2.1.6　电阻的测量

测量电阻的阻值时需要选择欧姆挡。MF-47 型万用表的欧姆挡具体又分为×1Ω、×10Ω、×1kΩ和×10kΩ挡。

下面通过测量一只电阻的阻值大小来说明欧姆挡的使用，测量如图 2-9 所示，具体过程说明如下。

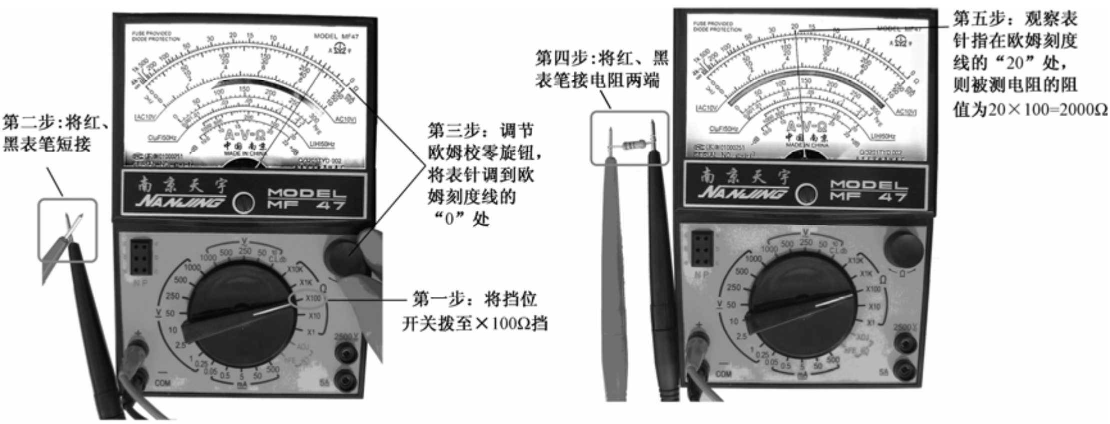
第一步：选择挡位。**测量前先估计被测电阻的阻值大小，选择合适的挡位。挡位选择的原则是：在测量时尽可能让表针指在欧姆刻度线的中央位置，因为表针指在刻度线中央时的测量值最准确，若不能估计电阻的阻值，可先选高挡位测量，如果发现阻值偏小时，再换成合适的低挡位重新测量。**现估计被测电阻阻值为几百至几千欧，选择挡位×100Ω较为合适。

第二步：欧姆校零。挡位选好后要进行欧姆校零，欧姆校零过程如图 2-9（a）所示。

先将红、黑表笔短接，观察表针是否指到欧姆刻度线（第 1 条刻度线）的“0”处，若表针没有指在“0”处，可调节欧姆校零旋钮，将表针调到“0”处为止，如果无法将表针调到“0”处，一般为万用表内部电池用旧所致，需要更换新电池。

第三步：红、黑表笔接被测电阻。电阻没有正、负正分，红、黑表笔可随意接被测电阻两端。

第四步：读数。读数时查看欧姆刻度线，观察表针所指的数值，然后将该数值与挡位数相乘，得到的结果就是该电阻的阻值。在图 2-9（b）中，万用表表针指在数值“20”处，选择挡位为×100Ω，则被测电阻的阻值为 20×100Ω=2000Ω。



（a）欧姆校零　　（b）测量电阻

图 2-9　电阻的测量

2.1.7　万用表使用注意事项

万用表使用时要按正确的方法进行操作，否则会出现测量值不准确，重则会烧坏万用表，甚至会触电危害人身安全。万用表使用时要注意以下事项。

（1）测量时不要选错挡位，特别是不能用电流或电阻挡来测电压，这样极易烧坏万用表。万用表不用时，可将挡位置于交流电压最高挡（如 1000V 挡）。

（2）测量直流电压或直流电流时，要将红表笔接电源或电路的高电位、黑表笔接低电位，如果表笔接错表针会反偏，这时应马上互换红、黑表笔位置。

（3）若不能估计被测电压、电流或电阻的大小，应先用最高挡，如果高挡位测量值偏小，可根据测量大小重新选择相应的低挡位。

（4）测量时，手不要接触表笔金属部位，以免触电或影响测量精确度。

（5）测量电阻阻值和三极管放大倍数时要进行欧姆校零，如果旋钮无法将表针调到欧姆刻度线的“0”处，一般是万用表内部电池用旧，可更换新电池。

2.2　数字万用表

数字万用表与指针万用表相比，具有测量准确度高、测量速度快、输入阻抗大、过载能力

强和功能多等优点，所以它与指针万用表一样，在电工测量方面得到了广泛的应用。

数字万用表的种类很多，但使用基本相同，下面以应用较广泛且价格便宜的 DT-830B 型数字万用表为例来说明数字万用表的使用。

2.2.1 面板介绍

数字万用表的面板上主要有液晶显示屏、挡位选择开关和各种插孔。DT-830B 型数字万用表面板如图 2-10 所示。



图 2-10 DT-830B 型数字万用表的面板

1. 液晶显示屏

液晶显示屏用来显示被测量的数值，它可以显示 4 位数字，但最高位只能显示到 1，其他位可显示 0～9。

2. 挡位选择开关

挡位选择开关的功能是选择不同的测量挡位，它包括直流电压挡、交流电压挡、直流电流挡、欧姆挡、二极管测量挡和三极管放大倍数测量挡。

3. 插孔

数字万用表的面板上有 3 个独立插孔和 1 个 6 孔组合插孔。标有“COM”字样的为黑表笔插孔，标有“VΩmA”的为红表笔插孔，标有“10ADC”的为大电流插孔，在测量 200mA～10A 范围内的直流电流时，红表笔要插入该插孔。6 孔组合插孔为三极管测量插孔。

2.2.2 测量直流电压

DT830B 型万用表的直流电压挡具体又分为 200mV 挡、2000mV 挡、20V 挡、200V 挡、1000V 挡。

下面通过测量一节电池的电压值来说明直流电压的测量，测量如图 2-11 所示，具体过程说明如下。

第一步：选择挡位。一节电池的电压通常在 1.5V 左右，根据挡位应高于且最接近被测电压的原则，选择 20V 挡最为合适。

第二步：红、黑表笔接被测电压。红表笔接被测电压的高电位处（电池的正极），黑表笔接被测电压的低电位处（电池的负极）。

第三步：在显示屏上读数。现观察显示屏显示的数值为 1.38，则被测电池的直流电压为 1.38V。若显示屏显示的数字不断变化，可选择其中较稳定的数字作为测量值。



图 2-11　直流电压的测量

2.2.3　测量交流电压

DT-830B 型万用表的交流电压挡具体又分为 200V 挡和 1000V 挡。

下面通过测量市电的电压值来说明交流电压的测量，测量如图 2-12 所示，具体过程如下。

第一步：选择挡位。市电电压通常在 220V 左右，根据挡位应高于且最接近被测电压的原则，选择 750V 挡最为合适。

第二步：红、黑表笔接被测电压。由于交流电压无正、负极之分，故红、黑表笔可随意分别插入市电插座的两个插孔中。

第三步：在显示屏上读数。现观察显示屏显示的数值为 231，则市电的电压值为 231V。

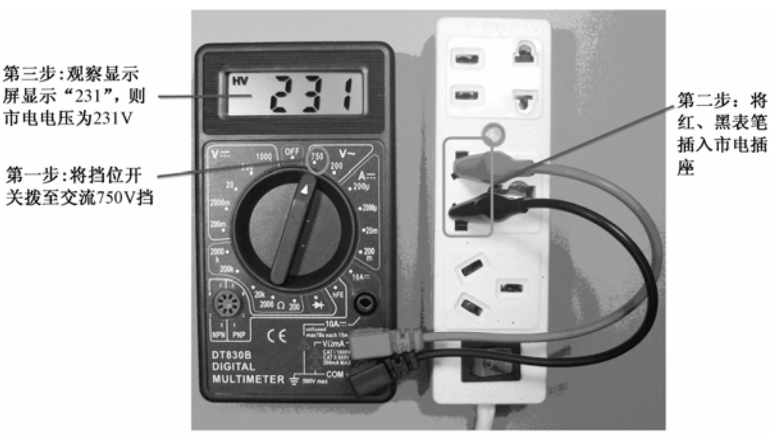


图 2-12　交流电压的测量

2.2.4　电阻的测量

万用表测电阻时采用欧姆挡，DT-830B 型万用表的欧姆挡具体又分为 200Ω挡、2000Ω挡、20kΩ挡、200kΩ挡和 2000kΩ挡。

下面通过测量一个电阻的阻值来说明欧姆挡的使用，测量如图 2-13 所示，具体过程说明如下。

第一步：选择挡位。估计被测电阻的阻值不会大于 1kΩ，根据挡位应高于且最接近被测电阻阻值的原则，选择 2000Ω挡最为合适。若无法估计电阻的大致阻值，可先用最高挡测量，若发现偏小，再根据显示的阻值更换合适低挡位重新测量。

第二步：红、黑表笔接被测电阻的两个引脚。

第三步：在显示屏上读数。现观察显示屏显示的数值为 992，则被测电阻的阻值为 992Ω。

注意：数字万用表在使用低欧姆挡（200Ω挡）测量时，将两根表笔短接，可能会发现显示屏显示的阻值不为零，一般在零点几欧至几欧之间，性能好的数字万用表该值很小。由于数字万用表无法进行欧姆校零，如果对测量准确度要求很高，可先记下表笔短接时的阻值，再将测量值减去该值，即为被测电阻的实际值。

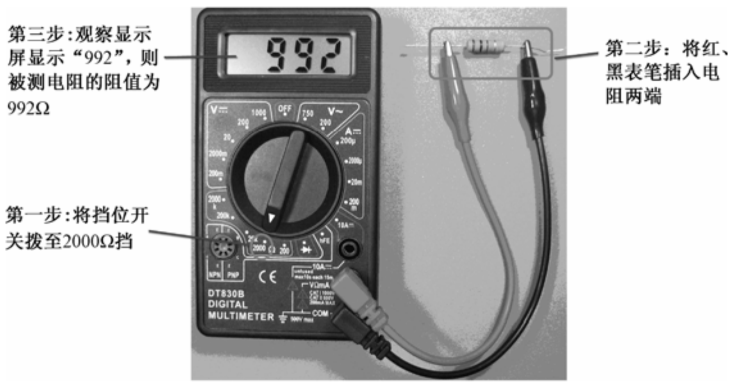


图 2-13　电阻的测量

2.3　电　度　表

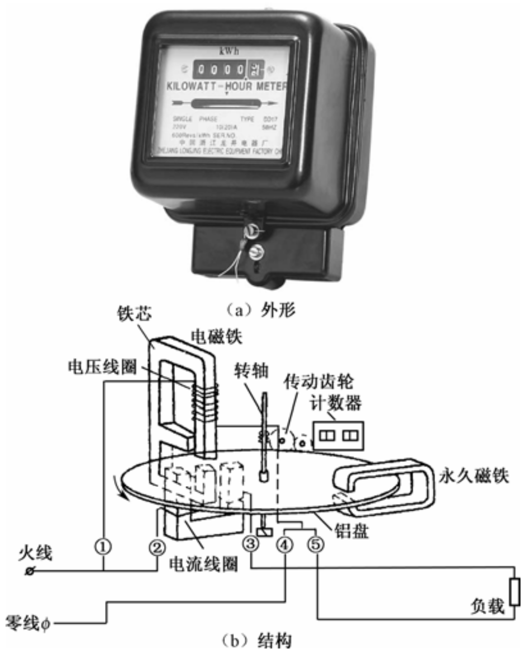
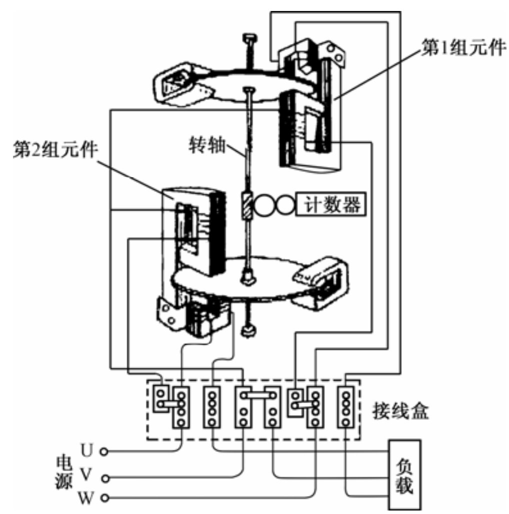
电度表又称电能表，它是一种用来计算用电量（电能）的测量仪表。电度表可分为单相电度表和三相电度，分别用在单相和三相交流电路中。

2.3.1　电度表的结构与原理

根据工作方式的不同，**电度表可分为感应式和电子式。**电子式电度表是利用电子电路驱动计数机构来对电能进行计数的，而感应式电度表是利用电磁感应产生力矩来驱动计数机构对电能进行计数的。感应式电度表由于成本低，结构简单，所以被广泛应用。感应式电度表分为单

相电度表和三相电度表，其结构与原理说明见表 2-1。

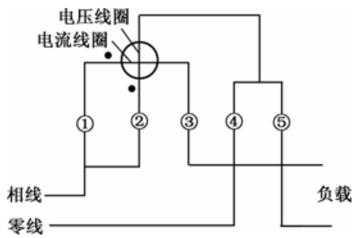
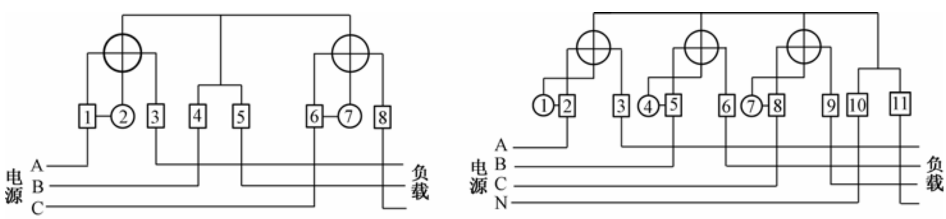
表 2-1　单相电度表和三相电度表的结构与原理说明

类型	说　　明	示　　图
单相电度表	单相电度表（感应式）的外形及内部结构如图 1 所示。 从图（b）可以看出，单相电度表内部垂直方向有一个铁芯，铁芯中间夹有一个铝盘，铁芯上绕着线径小、匝数多的电压线圈，在铝盘的下方水平放置着一个铁芯，铁芯上绕有线径粗、匝数少的电流线圈。 当电度表按图示的方法与电源及负载连接好后，电压线圈和电流线圈均有电流通过，而都产生磁场，它们的磁场分别通过垂直和水平方向的铁芯作用于铝盘，铝盘受力转动，铝盘中央的转轴也随之转动，它通过传动齿轮驱动计数器计数。如果电源电压高、流向负载的电流大，两个线圈产生的磁场强，铝盘转速快，通过转轴、齿轮驱动计数器的计数速度快，计数出来的电量更多。永久磁铁的作用是让铝盘运转保持平衡。	 图 1　单相电度表
三相三线式电度表	三相三线式电度表内部结构如图 2 所示。从图中可以看出，三相三线式电度表有两组与单相电度表一样的元件，这两组元件共用一根转轴、减速齿轮和计数器，在工作时，两组元件的铝盘共同带动转轴运转，通过齿轮驱动计数器进行计数。 三相四线式电度表结构与三相三线式电度表类似，但它内部有 3 组元件共同来驱动计数机构。	 图 2　三相三线式电度表内部结构

2.3.2　电度表的接线方式

电度表在使用时，要与线路正确连接才能正常工作，如果连接错误，轻则会出现电量计数错误，重则烧坏电度表。在接线时，除了要注意一般的规律外，还要认真查看电度表接线说明图，按照说明图来接线。电度表的接线方式说明见表 2-2。

表 2-2　电度表的接线方式说明

接线方式	说　　明
单相电度表的接线方式	单相电度表常见的接线方式如图 1 所示。  图 1　单相电度表常见的接线方式 **图中圆圈上的水平线表示电流线圈，其线径粗、匝数小、阻值小，在接线时，要串接在电源相线和负载之间；圆圈上的垂直线表示电压线圈，其线径细、匝数多、阻值大，在接线时，要接在电源相线和零线之间。**另外，电度表电压线圈、电流线圈的电源端（该端一般标有圆点）应共同接电源进线。
三相电度表的接线方式	三相电度表可分为三相三线式电度表和三相四线式电度表，它们的接线方式如图 2 所示。  （a）三相三线式电度表　　（b）三相四线式电度表 图 2　三相电度表的接线方式
电度表在高电压电路中接线使用的器件——电压互感器	在使用电度表时，要求所接电路的电压不能超过电度表的额定电压。**如果希望容量小的电度表也能测量高电压电路的电能，可在电路与电度表之间加接电压互感器。** **电压互感器是一种能将交流电压升高或降低的器件**，其结构如图 3 所示。从图中可以看出，电压互感器是由两组线圈绕在铁芯上构成的，一组线圈（可称做初级线圈，其匝数为 N_1）并接在电源线上，另一组线圈（可称做次级线圈，其匝数为 N_2）接有一个电压表，当电源电压加到初级线圈时，该线圈产生磁场，磁场通过铁芯穿过次级线圈，次级线圈两端即产生电压。电压互感器的初级线圈电压 U_1 与次级线圈电压 U_2 有下面的关系： $$\frac{U_1}{U_2}=\frac{N_1}{N_2}$$ 从上面的式子可以看出，**电压互感器线圈两端的电压与匝数成正比，即匝数多的线圈两端的电压高，匝数少的线圈两端电压低。**

续表

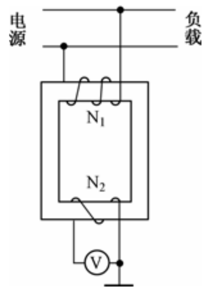
<table>
<tr><th>接线方式</th><th>说　明</th></tr>
<tr><td>电度表在高电压电路中接线使用的器件——电压互感器</td><td>因此，当电度表接在高电压电路中时，应在电度表与电路之间接电压互感器，匝数多的线圈并接在电源线上，匝数少的线圈与电度表内电压线圈并接。


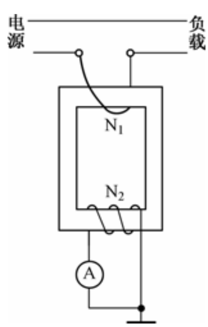
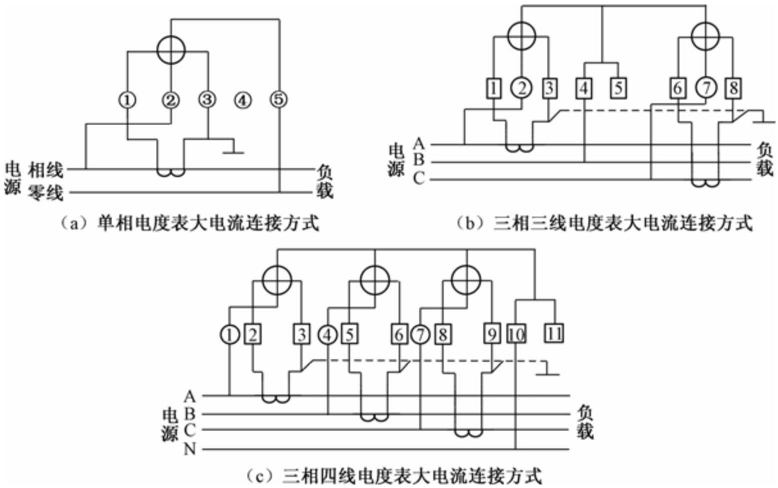
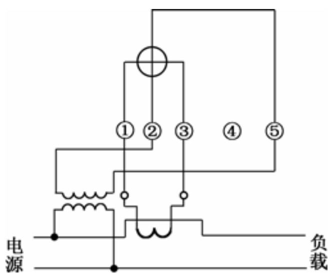
图 3　电压互感器结构</td></tr>
<tr><td>大电流电路中的电度表接线方式</td><td>在使用电度表时，要求所接电路的电流不能超过电度表的额定电流。如果希望容量小的电度表也能测量大电流电路的电能，可在电路与电度表之间加接电流互感器。
（1）电流互感器
电流互感器是一种能增大或减少交流电流的器件，其结构如图 4 所示。从图中可以看出，电流互感器与电压互感器结构基本相同，不同点主要在于电压互感器的一组线圈并接在电源线上，而电流互感器的一组线圈串接在一根电源线上。当有电流流过初级线圈时，线圈产生磁场，磁场通过铁芯穿过次级线圈，次级线圈两端有电压产生，与线圈连接的电流表有电流流过。电流互感器的初级线圈电流 I_1 与次级线圈电流 I_2 有下面的关系：
$$\frac{I_2}{I_1}=\frac{N_1}{N_2}$$
从上面的式子可以看出，线圈流过的电流大小与匝数成反比，即匝数多的线圈流过的电流小，匝数少的线圈流过的电流大。
因此，当电度表接在大电流电路中时，应在电度表与电路之间接电流互感器，匝数少的线圈串接在电源线上，匝数多的线圈与电度表内部的电流线圈并接。


图 4　电流互感器结构
（2）在大电流电路中的电度表接线方式
当电度表需要测量大电流电路时，可在电源线与电度表之间加接电流互感器。图 5 是几种在大电流电路中的电度表接线方式，其中，图（a）为单相电度表的接线方式，图（b）为三相三线式电度表的接线方式，图（c）为三相四线式电度表的接线方式。</td></tr>
</table>

续表

接线方式	说　　明
大电流电路中的电度表接线方式	 （a）单相电度表大电流连接方式　（b）三相三线电度表大电流连接方式 （c）三相四线电度表大电流连接方式 图 5　电度表大电流连接方式 在电度表与电流互感器配合使用测量电路电量时，电度表测得的值并不是电路的实际用电量，实际用电量应等于电度表的值与电流互感器的变流比。 以图 5（a）为例，若电流互感器的变流比为 400/5，电度表一天变化值为 10kWh，那么该天负载实际消耗电能为 10kWh • 400/5=800kWh。
大电流高电压电路中的电度表接线方式	**当电度表需要测量大电流、高电压电路时，可在电源线与电度表之间加接电流互感器和电压互感器。**图 6 是单相电度表在大电流高电压电路中的接线方式。  图 6 单相电度表在大电流、高电压中的接线方式 在电度表与电流互感器、电压互感器配合使用时，电度表测得的值并不是电路的实际用电量，实际用电量应等于电度表的测量值、电流互感器的变流比和电压互感器的变压比三者的乘积。

2.3.3　用电度表测量电器的功率

有些电器标有功率大小（如灯泡），也有些电器没有标出功率（如电脑），还有些电器有多个挡位，虽然标出了功率，但它只是其中一个挡的功率，如电风扇。对于后面两种类型的电器，可以借助电度表来测量它们的功率大小。

下面以测量一台电脑工作时的功率为例来说明。详细过程如下。

（1）查看电度表的常数 R。以表 2-1 中的图 1（a）所示的电度表为例，它的常数 R 为 600Revs/kWh（即 600 转/千瓦时），其含义是当电度表转盘旋转 600 圈时，计得的电量为 1kWh（即 1 度电）。

（2）将电度表接的所有电器关掉，仅让电脑开机。

（3）观察并记录电度表转盘旋转的圈数 r 和所用的时间 t。在记录时，圈数应为整数，圈数越多，测量将会更准确，这里假设 r=9、t=360s。

（4）用公式 $P=\dfrac{3600\cdot r}{t\cdot R}$ 计算电脑的功率（P 为功率，单位为 kW）。将有关值代入式子可计算出电脑的功率为

$$P=\frac{3600\cdot r}{t\cdot R}=\frac{3600\times 9}{360\times 600}=0.15\text{kW}=150\text{W}$$

注意：电脑硬件配置不同，其功率不同，运行程序时较不运行程序时消耗功率更大。

用上述方法不但可以测量出某电器的功率，还可以检验电度表计量的准确性。在检验电度表时，先找一个标注准确的 100W 灯泡，然后用测量电脑功率的方法测量并计算该灯泡的功率，若测量计算出功率与灯泡标注功率相同，则说明电度表计量准确，否则计量不准确。

2.3.4　电子式电度表

电子式电度表内部采用电子电路构成测量电路来对电能进行测量，它与前面介绍的电磁感应式电度表比较，具有精度高、可靠性好、功耗低、过载能力强、体积小和重量轻等优点。有些电子式电度表采用一些先进的电子测量电路，故可以实现很多智能化的电能测量功能。**常见的电子式电度表有普通电子式电度表、电子式预付费电度表和电子式多费率电度表。**常见的电子式电度表说明见表 2-3。

表 2-3　常见的电子式电度表说明

类型	说　　明	示　　图
普通电子式电度表	普通电子式电度表采用了电子测量电路来对电能进行测量。根据显示方式不同，它可以分为滚轮显示电度表和数码显示电度表，图 1 是一种滚轮显示电子电度表。 由于电子式滚轮显示电度表内部没有铝盘，不能带动滚轮计数器，所以这种电度表内部采用一个小型电动机，在测量时由测量电路来驱动电动机旋转，电动机再带动滚轮计数器旋转来进行计数。电子式数码显示电度表则是由测量电路输出显示信号，直接驱动数码显示器显示电量数值。	 图 1　一种滚轮显示式电子电度表

续表

类型	说　　明	示　　图
电子式预付费电度表	**电子式预付费电度表是一种先缴电费再用电的电度表。**图 2 就是一种电子式预付费电度表。 这种电度表内部采用了微处理器（CPU）、存储器、通信接口电路和继电器等。它在使用前，需先将已充值的购电卡插入电度表的插槽，在内部 CPU 的控制下，购电卡中的数据被读入电度表的存储器，并在显示器上显示可使用的电量值。在用电过程中，显示器上的电量值根据电能的使用量减少，当电量值减小到 0 时，CPU 会通过电路控制内部继电器开路，输入电度表的电因继电器开路而无法输出，从而切断了用户的供电。 根据充值方式不同，电子式预付费电度表可以分为 IC 卡充值式、射频卡充值式和远程充值式等，图 2 就是一种 IC 卡充值式。射频卡充值式电度表只需将卡靠近电度表，卡内数据就会被电度表内的接收器读入存储器。远程充值式预付费电度表有一根通信电缆与远处缴费中心的电脑连接，在充值时，只要在电脑中输入充电值，电脑会通过电缆将有关数据送入电度表，从而实现远程充值。	 图 2　一种电子式预付费电度表
电子式多费率电度表	**电子式多费率电度表又称分时计费电度表，它可以实现不同时段执行不同的计费标准。**图 3 是一种电子式多费率电度表。这种电度表依靠内部的单片机进行分时段计费控制，此外还可以显示出峰、平、谷电量和总电量等数据。	 图 3　一种电子式多费率电度表

2.4 钳　形　表

钳形表又称为钳形电流表，它是一种测量电气线路电流大小的仪表。与电流表和万用表相比，**钳形表的优点是在测电流时不需要断开电路。**

钳形表可分为指针式钳形表和数字式钳形表两类。指针式钳形表是利用内部电流表的指针摆动来指示被测电流的大小；数字式钳形表是利用数字测量电路将被测电流处理后，再通过显

示器以数字的形式将电流值显示出来。

2.4.1　钳形表的结构与测量原理

钳形表有指针式和数字式之分，这里以指针式为例来说明钳形表的结构与工作原理。指针式钳形表的结构如图 2-14 所示。从图中可以看出，指针式钳形表主要由铁芯、线圈、电流表、量程旋钮和扳手等组成。

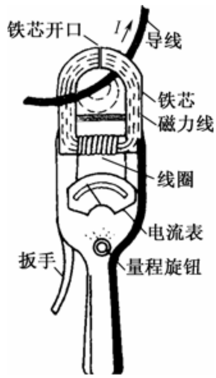


图 2-14　指针式钳形表的结构

在使用钳形表时，按下扳手，铁芯开口张开，从开口处将导线放入铁芯中央，再松开扳手，铁芯开口闭合。当有电流流过导线时，导线周围会产生磁场，磁场的磁力线沿铁芯穿过线圈，线圈马上产生电流，该电流经内部一些元件后流进电流表，电流表表针摆动，指示电流的大小。流过导线的电流越大，导线产生的磁场越强，穿过线圈的磁力线越多，线圈产生的电流就越大，流进电流表的电流就越大，表针摆动幅度就越大，指示的电流值也越大。

2.4.2　指针式钳形表

1．实物外形

图 2-15 列出了一些指针式钳形表的实物外形。早期的钳形表仅能测电流，而现在有很多钳形表将钳形表和万用表结合起来，不但可以测电流，还能测电压和电阻，图 2-15 中的几种钳形表就具有这些功能。

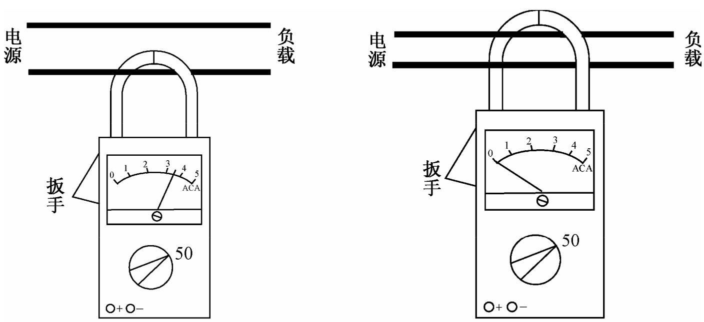


图 2-15　一些常见的指针式钳形表

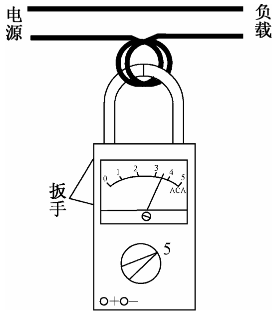
2．指针式钳形表的使用

指针式钳形表的使用见表 2-4。

表 2-4　指针式钳形表的使用说明

关键点	说　　明
测量准备	**在使用钳形表测量前，要做好以下准备工作：** ① **安装电池。**早期的钳形表只能测电流，不需安装电池，而现在的钳形表不但能测电流、电压，还能测电阻，而测电阻时要求表内安装电池。安装电池时，打开电池盖，将大小和电压值符合要求的电池装入钳形表的电池盒，安装时要注意电池的极性与电池盒标注相同。 ② **机械校零。**将钳形表平放在桌面上，观察表针是否指在电流刻度线的“0”刻度处，若没有，可用螺丝刀调节刻度盘下方的机械校零旋钮，将表针调到“0”刻度处。 ③ **安装表笔。**如果仅用钳形表测电流，可不安装表笔，若要测量电压和电阻，就需要给钳形表安装表笔。安装表笔时，红表笔插入标“＋”的插孔，黑表笔插入标“–”或标“COM”的插孔。
测量过程	**在使用钳形表测电流时，一般按下面的过程进行：** ① **估计被测电流大小的范围，选取合适的电流挡位。**选择的电流挡应大于被测电流，若无法估计电流范围，可先选择大电流挡测量，测得偏小时再选择合适的小电流挡。 ② **钳入被测导线。**在测量时，按下钳形表上的扳手，张开铁芯，钳入一根导线，如图 1（a）所示，表针摆动，指示导线流过的电流大小。 测量时要注意，不能将两根导线同时钳入，图 1（b）所示的测量是错误的，这是因为两根导线流过的电流大小相等，但方向相反，两根导线产生的磁场方向是相反的，相互抵消，钳形表测出的电流值将为 0，如果不为 0，则说明两根导线流过的电流不相等，负载存在漏电（一根导线的部分电流经绝缘性能差的物体直接到地，没有全部流到另一根线上），此时钳形表测出值为漏电电流值。  （a）正确的测量方法　　（b）错误的测量方法 图 1　钳形表的测量方法 ③ **读数。**在读数时，观察并记下表针指在“ACA”（交流电流）刻度线的数值，再配合挡位数进行综合读数。例如图 1（a）的测量中，表针指在 ACA 刻度线的数值 3.5 处，此时挡位为电流 50A 挡，读数时要将 ACA 刻度线最大值 5 看成 50，3.5 则为 35，即被测导线流过的电流值为 35A。 **如果被测导线的电流较小，可以将导线在钳形表的铁芯上绕几圈再测量，**如图 2 所示，将导线在铁芯绕了 2 圈，这样测出电流的值是导线是实际电流的 2 倍，图中表针指在 3.5 处，挡位开关置于 5A 挡，导线的实际电流应为 3.5/2=1.75A。

续表

关键点	说　明
测量过程	 图 2　钳形表测量小电流的方法 大多数钳形表可以在不断开电路的情况下测量电流，还能像万用表一样测电压和电阻。钳形表在测电压和电阻时，需要安装表笔，用表笔接触电路或元件来进行测量，具体测量方法与万用表一样，这里不再叙述。
注意事项	在使用钳形表时，为了安全和测量准确，需要注意以下事项： （1）在测量时要估计被测电流的大小，选择合适的挡位，不要用低挡位测大电流，若无法估计电流大小，可先选高挡位，如果偏小再选相应低挡位。 （2）在测量导线电流时，每次只能钳入一根导线，若钳入导线后发现有振动和碰撞声，应重新打开钳口，并开合几次，直至噪声消失为止。 （3）在测大电流后再测小电流时，也需要开合钳口数次，以消除铁芯上的剩磁，以免产生测量误差。 （4）在测量时不要切换量程，以免切换时表内线圈瞬间开路，线圈感应出很高的电压而损坏表内的元件。 （5）在测量一根导线电流时，应尽量让其他的导线远离钳形表，以免这些导线产生的磁场影响测量结果，而使测量误差增大。 （6）在测量裸露线时，需要用绝缘板将其他的导线隔开，以免测量时钳形表开合钳口引起短路。

2.4.3　数字式钳形表

1．实物外形

图 2-16 列出了一些数字式钳形表实物外形。数字钳形表有两类，一类只能测电流，另一类将数字万用表和钳形表结合在一起，不但可以测电流，还能测电压、电阻等。图 2-16 中的第一种钳形表只能测电流，而后面两种具有钳形表和万用表的复合功能。

2．数字式钳形表的使用

数字式钳形表与指针式钳形表的使用方法基本类似，不同点主要是读数方式不同。如果掌握了数字式万用表和指针式钳形表的使用方法，就很容易学会使用数字式钳形表。

在使用数字钳形表前，首先要给它安装合适的电池。没安装电池的钳形表是无法工作的，既不能测电流，更无法测电压和电阻。**使用数字钳形表一般按以下步骤进行：**

（1）估计被测电流的大小选择合适的电流挡位。其选择原则与指针式钳形表相同。

（2）测量时钳入一根导线。



图 2-16　一些较常见的数字式钳形表

（3）读数时直接从显示器上读出电流大小。读数时要注意显示器数值的小数点，数值的单位与所选电流挡的单位一致，如选择为“～400A”挡，显示屏显示的数值为“36.8”，那么被测电流的大小应为 36.8A。读数时，若显示屏上的数值大小变化，可选较稳定的值读出。

如果使用数字钳形表测电压和电阻，需要给它安装表笔，用表笔接触被测电路和元件进行测量。使用数字式钳形表的注意事项与指针式钳形表基本一致。

2.5 兆　欧　表

兆欧表是一种测量绝缘电阻的仪表，由于这种仪表的阻值单位通常为兆欧（MΩ），所以常称做兆欧表（有些仪表阻值单位为 GΩ，但习惯上仍将其称做兆欧表）。**兆欧表主要用来测量电气设备和电气线路的绝缘电阻。**

兆欧表可以测量绝缘导线的绝缘电阻，判断电气设备是否漏电等。有些万用表也可以测量兆欧级的电阻，但万用表本身提供的电压低，无法测量高压下电气设备的绝缘电阻，如有些设备在低压下绝缘电阻很大，但电压升高，绝缘电阻很小，漏电很严重，容易造成触电事故。而兆欧表在测量时，内部会产生几百至几千伏的高压，将这样的电压加到被测物来测其绝缘电阻。

根据工作和显示方式的不同，**兆欧表通常可分为三类：摇表、指针式兆欧表和数字式兆欧表。**

2.5.1　摇表

1．实物外形

图 2-17 列出了几种摇表的实物外形。

2．工作原理

摇表主要由磁电式比率计、手摇式发电机和测量电路组成，其工作原理示意图如图 2-18 所示。



图 2-17　两种常见的摇表

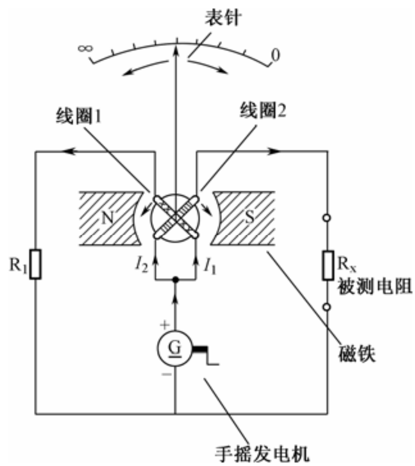


图 2-18　摇表的工作原理示意图

在使用摇表测量时，将被测电阻按图示的方法接好，然后摇动手摇发电机，发电机产生几百伏至几千伏的高压，并从“＋”端输出电流，电流分为 I_1、I_2 两路，I_1 经线圈 1、R_1 回到发电机的“–”端，I_2 经线圈 2、被测电阻 R_2 回到发电机的“–”端。

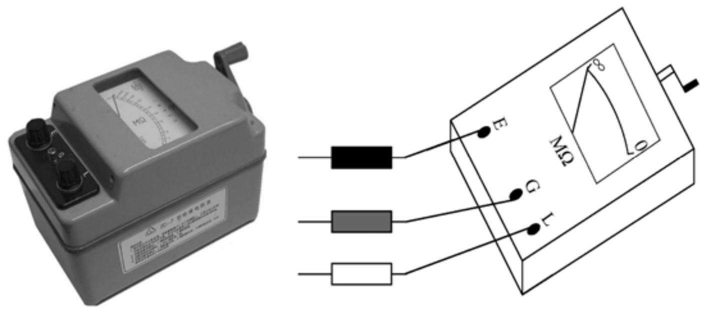
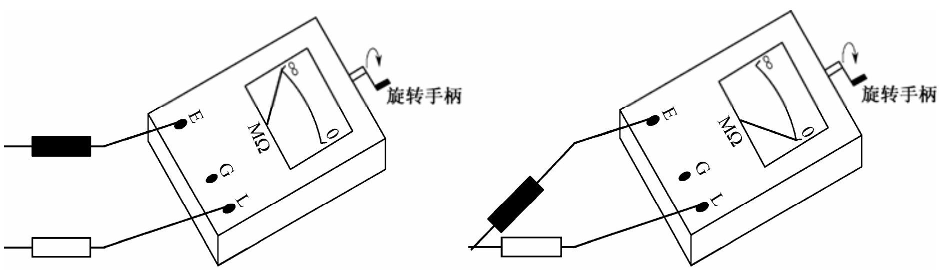
线圈 1、线圈 2、表针和磁铁组成磁电式比率计。当线圈 1 流过电流时，会产生磁场，线圈产生的磁场与磁铁的磁场相互作用，线圈 1 逆时针旋转，带动表针往左摆动指向“∞”处；当线圈 2 流过电流时，表针会往右摆动指向 0；当线圈 1、2 都有电流流过时（两线圈参数相同），若 $I_1=I_2$，即 $R_1=R_x$ 时，表针指在中间，若 $I_1>I_2$，即 $R_1<R_x$ 时，表针偏左，指示 R_x 的阻值大，若 $I_1<I_2$，即 $R_1>R_x$ 时，表针偏右，指示 R_x 的阻值小。

在摇动发电机时，由于摇动时很难保证发电机匀速转动，所以发电机输出的电压和流出的电流是不稳定的，但因为流过两线圈的电流同时变化，如果发电机输出电流小时，流过两线圈的电流都会变小，它们受力的比例仍保持不变，故不会影响测量结果。另外，由于发电机会发出几百伏至几千伏的高压，它经线圈加到被测物两端，这样测量能真实反映被测物在高压下的绝缘电阻大小。

3．摇表的使用

摇表的使用说明见表 2-5。

表 2-5　摇表的使用说明

关键点	说　　明
测量准备	**摇表在使用前，要做好以下工作：** ① **接测量线。摇表有三个接线端：L 端（LINE：线路测试端）、E 端（EARTH：接地端）和 G 端（GUARD：防护屏蔽端），**如图 1 所示。在使用前将三根测试线分别接在摇表的这 3 个接线端上。一般情况下，只需给 L 端和 E 端接测试线，G 端可以不使用。  图 1　摇表的接线端 ② **进行开路实验。**让 L 端、E 端之间处于开路，然后转动摇表的摇柄，使转速达到额定转速（每分钟 120 转左右），这时表针应指在“∞”处，如图 2（a）所示，若不能指到该位置，则摇表有故障。 ③ **进行短路实验。**将 L 端、E 端测量线短接，再转动摇表的摇柄，使转速达到额定转速，这时表针应指在“0”处，如图 2（b）所示。 若开路和短路实验都正常，就可以开始用摇表进行测量。  （a）开路实验　　（b）短路实验 图 2　摇表测量前的实验
测量过程	**在使用摇表测量电气设备绝缘电阻时，一般按下面过程进行：** ① **根据被测物额定电压大小来选择相应额定电压的摇表。**摇表在测量时，内部发电机会产生电压，并不是所有的摇表产生的电压都相同，如 ZC25-3 型摇表产生 500V 电压，而 ZC25-4 型摇表能产生 1000V 电压。选择摇表时，要注意其额定电压要较待测电气设备的额定电压高，例如额定电压为 380V 及以下的被测物，可选用额定电压为 500V 的摇表来测量。有关摇表的额定电压大小，可查看摇表上的标注或说明书。一些不同额定电压下的被测物及选用的摇表见下页。

续表

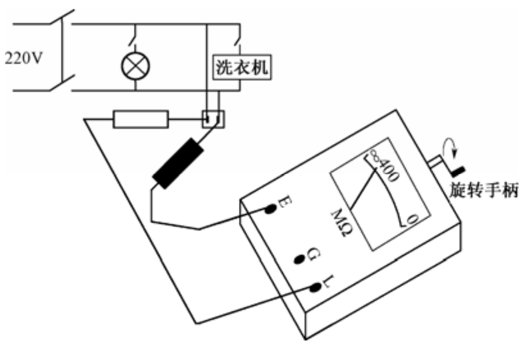
<table>
<tr><th>关键点</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td>测量过程</td><td>
不同额定电压下的被测物及选用的摇表
<table>
<tr><th>被　测　物</th><th>被测物的额定电压/V</th><th>所选兆欧表的额定电压/V</th></tr>
<tr><td rowspan="2">线圈</td><td>＜500</td><td>500</td></tr>
<tr><td>≥500</td><td>1000</td></tr>
<tr><td>电力变压器和电动机绕组</td><td>≥500</td><td>1000～2500</td></tr>
<tr><td>发电机绕组</td><td>≤380</td><td>1000</td></tr>
<tr><td rowspan="2">电气设备</td><td>＜500</td><td>500～1000</td></tr>
<tr><td>≥500</td><td>2500</td></tr>
</table>
② 测量并读数。在测量时，切断被测物的电源，将 L 端与被测物的导体部分连接，E 端与被测物的外壳或其他相关导体连接，然后转动摇表的手柄，让转速保持每分钟 120 转（允许有 20％的转速误差），待表针稳定后进行读数。
</td></tr>
<tr><td>使用举例</td><td>
下面举几个例子来说明摇表的使用。
① 测量电网线间的绝缘电阻。
测量示意图如图 3 所示。测量时先切断 220V 市电，并将所有的用电设备的开关都断开，再将摇表的 L 端和 E 端测量线分别插入插座的两个插孔，然后摇动手柄查看表针所指数值，图中表针指在 400MΩ，说明电源插座两插孔之间的绝缘电阻为 400MΩ。
如果电源插座两插孔之间的绝缘电阻很小，如几 MΩ，有可能是插座两个插孔之间绝缘性能不好，也可能是两根电网线间绝缘较差，还有可能是用电设备的开关或插座绝缘不好。


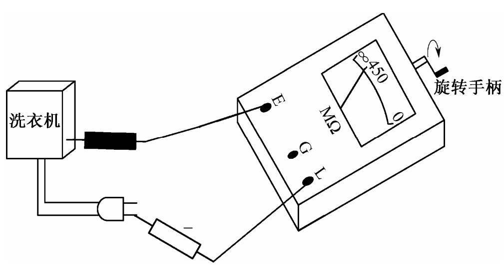
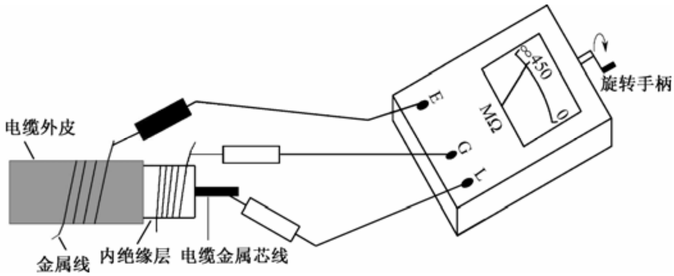
图 3　用摇表测量电网线间的绝缘电阻
② 测量用电设备外壳与线路间的绝缘电阻。
这里以测洗衣机外壳与线路间的绝缘电阻为例来说明，冰箱、空调等设备测量方法与之相同。测量洗衣机外壳与线路间的绝缘电阻如图 4 所示。


图 4　用摇表测量用电设备外壳与线路间的绝缘电阻
</td></tr>
</table>

续表

关键点	说　　明
使用举例	测量时，拔出洗衣机的电源插头，将摇表的 L 端测量线接电源插头，E 端测量线接洗衣机外壳，这样测量的是洗衣机的电气线路与外壳之间的绝缘电阻。正常情况下这个阻值应很大，如果该阻值小，说明内部电气线路与外壳之间存在着较大的漏电电流，若人接触外壳会造成触电，这时应检查电气线路与外壳漏电的原因。 ③ 测量电缆的绝缘电阻。 用摇表测量电缆的绝缘电阻如图 5 所示。  图 5　用摇表测量电缆的绝缘电阻 图中的电缆有三部分：电缆金属芯线、内绝缘层和电缆外皮，测这种多层电缆时一般要用到摇表的 G 端。在测量时，分别各用一根金属线在电缆外皮和内绝缘层上绕几圈（其目的是使摇表的测量线与外皮、内绝缘层接触更充分），再将 E 端测量线接电缆外皮金属线，将 G 端测量线接内绝缘层金属线，L 端则接金属芯线。这样连接好后，摇动手柄就可以测量电缆的绝缘电阻。将内绝缘层与 G 端相连，目的是让内绝缘层上的漏电电流直接流入 G 端，而不会流入 E 端，这样就避免了漏电电流影响测量值。
注意事项	在使用摇表测量时，要注意以下事项： ① 正确选用合适额定电压的摇表。选用额定电压过高的摇表测量易击穿被测物，选用低额定电压摇表测量则不能反映被测物的真实绝缘电阻。 ② 测量电气设备时，一定要切断设备的电源。切断电源后要等待一定的时间再测量，目的是让电气设备放完残存的电压。 ③ 测量时，测量线不能绕在一起。这样做的目的是避免测量线之间的绝缘电阻影响被测物。 ④ 测量时，顺时针由慢到快摇动手柄，直至转速达每分钟 120 转，一般在 1 分钟后读数（读数时仍要摇动手柄）。 ⑤ 在摇动手柄的，手不可接触测量线裸露部位和被测物，以免摇表产生的高压引起触电。 ⑥ 被测物表面应擦拭干净，不得有污物，以免造成测量数据不准确。

2.5.2　指针式兆欧表

指针式兆欧表与摇表一样，都采用指针来指示阻值大小，但指针式兆欧表内部采用升压电路，将几伏的电压升高到几百伏至几千伏，因此不用发电机，这样使指针式兆欧表小巧、轻便。另外，有些指针式兆欧表内部可以产生多种测试高压，这样就可以测量不同额定电压下的电气设备。

1．实物外形

图 2-19 列出了几种指针式兆欧表的实物外形。



图 2-19　几种常用的指针式兆欧表

2．使用方法

指针式兆欧表种类较多，但使用方法大同小异，学会了一种指针式兆欧表的使用方法，再使用其他类型的表就非常容易。下面以 MS5202 型指针式兆欧表为例来说明。

（1）MS5202 型指针式兆欧表介绍

MS5202 型指针式兆欧表是一种便携的、专业的测量仪器，适用于工业装置如电缆、变压器、发电机、开关等维护和维修的高压绝缘测试。MS5202 型指针式兆欧表的面板如图 2-20 所示，面板上各部分的名称如图中标注所示。



图 2-20　MS5202 型指针式兆欧表的面板

MS5202 型指针式兆欧表有关特点说明如下：

① 具有指针、数字双显功能。指针用于指示绝缘电阻的大小，数字显示屏显示测试电压。

② 具有自动量程转换功能。刻度盘上有两条刻度线，一条刻度线指示值为 0～2500MΩ；另一条指示值为 1000MΩ～无穷大。在测量 0 ～100000MΩ范围内的绝缘电阻时，仪表根据绝缘电阻大小自动切换高、低量程，并且相应刻度线旁的 LED 发光，指示用户在该刻度线上读数。

③ 使用 8 节 1.5V 电池作为电源。测量时，仪表的最大工作电流约 140mA，仪表可连续

工作约 4 小时。

④ 具有较稳定的测试电压。当被测绝缘电阻大于 100MΩ 时，仪表能保持稳定的测试电压（约 2500V， LCD 会显示出测试电压），使仪表能精确地测量绝缘电阻。

⑤ 在测量绝缘电阻时会提升仪表输出高压。当挡位开关置于 MΩ挡并按下测试按钮测量绝缘电阻时，仪表内藏报警系统会发出“哔哔”声，提醒操作者注意仪表输出较高的电压，小心避免电击。

（2）MS5202 型指针式兆欧表的使用

MS5202 型指针式兆欧表的使用说明见表 2-6。

表 2-6　MS5202 型指针式兆欧表的使用说明

关键点	说　　明
测量准备	**在使用指针式兆欧表测量前，需要先做好以下准备工作：** ① **调零。**将仪表平放在桌面上，并将功能开关置于“OFF”位置，观察指针是否指在刻度线“0”位置，若无，可调节调零旋钮，将指针调到“0”处。 ② **安装并检验电池。**让功能开关处于“OFF”位置，打开电池盖，安装 8 节 1.5V AA 电池，安装好后，再按下测量按钮，如指针指在刻度盘“BATT. OK”刻度范围，说明电池是好的，否则，说明电池已不能使用，应及时更换，以免影响绝缘电阻的测量精度并避免电池产生漏液损坏仪表。 ③ **安插测量线。**在仪表的 LINE 端、GUARD 和 EARTH 端分别安插各自的测量线，一般情况下，可不使用 GUARD 端。
测量过程	MS5202 兆欧表的一般测量过程如下： ① 将仪表的功能开关置于“OFF”位置。 ② 切断被测物的电源，将仪表的 EARTH 端测量线与被测物的接地端或相关部位连接起来，并确保连接良好。 ③ 将功能开关置于“MΩ”位置。 ④ 将 LINE 端的测试线探针接触在被测物的导体部位上，按下测量按钮。 ⑤ 标度盘上的 LED 会发光，当绿色 LED 亮时，在绿色刻度线上读数；当红色 LED 亮时，在红色刻度线上读数。另外在数字显示器上会显示出仪表的测试电压值。 ⑥ 测量完成后，松开测量按钮，并等待几秒钟再将测试线探针从被测物上移开，这样是为了释放被测物上可能存储的电荷（测量时由仪表产生的高压向被测线路充得的）。 由于测量时仪表内部功耗较大（电流达 150mA），所以一般情况下测量时间不要太长，即按下测量按钮时间不要太长。若需要连续一段时间测量被测物，可按下测量按钮并按顺时针方向旋转到“LOCK”位置，测量按钮被锁住，不能弹起，需要停止测量时，只要逆时针旋转测量按钮至弹起即可。

2.5.3　数字式兆欧表

数字式兆欧表是以数字的形式直观显示被测绝缘电阻的大小，它与指针式兆欧表一样，测试高压都是由内部升压电路产生的。

1．实物外形

图 2-21 列出了几种数字式兆欧表的实物外形。



图 2-21　几种常见的数字式兆欧表

2．使用方法

数字式兆欧表种类很多，使用方法基本相同，下面以 VC60B 型数字式兆欧表为例来说明。

（1）VC60B 型数字式兆欧表介绍

VC60B 型数字式兆欧表是一种使用轻便、量程广、性能稳定并且能自动关机的测量仪器。这种仪表内部采用电压变换器，可以将 9V 的直流电压变换成 250V/500V/1000V 的直流电压，因此可以测量多种不同额定电压下的电气设备的绝缘电阻。

VC60B 型数字式兆欧表的面板如图 2-22 所示，面板上各部分的名称如图中标注所示。



图 2-22　VC60B 型数字式兆欧表的面板

（2）VC60B 型数字式兆欧表的使用

VC60B 型数字式兆欧表的使用说明见表 2-7。

表 2-7　VC60B 型数字式兆欧表的使用说明

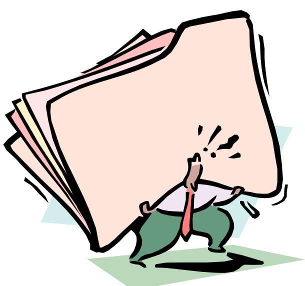
关键点	说　　明
测量准备	在测量前，需要先做好以下准备工作： ① 安装 9V 电池。 ② 安插测量线。VC60B 有 4 个测量线插孔：L 端（线路测试端）、G 端（防护或屏蔽端）、E2 端（第 2 接地端）和 E1 端（第 1 接地端），先在 L 端和 G 端各安插一条测量线（一般情况下 G 端可不安插测量线），另一条测量线可根据仪表的测量电压来选择安插在 E2 端或 E1 端，当测量电压为 250V 或 500V 时，测量线应安插在 E2 端，当测量电压为 1000V 时，则应插入 E1 端。

续表

<table>
<tr><th>关键点</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td>测量过程</td><td>
VC60B 兆欧表的一般测量过程如下：
① 按下“POWER（电源）”键。
② 选择测试电压。根据被测物的额定电压，按下 1000V、500V 或 250V 中的某一按钮来选择测试电压，如被测物用在 380V 电压中，可按下 500V 按钮，显示器左下角将会显示“500V”字样，这样测量时仪表会输出 500V 的测试电压。
③ 选择量程范围。操作“RANGE（量程选择）”开关，可以选择不同的阻值测量范围，在不同的测试电压下，操作“RANGE”开关选择的测量范围会不同，具体见下表。如测试电压为 500V，按下“RANGE”开关时，仪表可测量 50～1000MΩ范围内的绝缘电阻，“RANGE”开关处于弹起状态时，可测量 0.1～50MΩ范围内的绝缘电阻。
<table>
<tr><td colspan="2">测试电压</td><td>250V±10%</td><td>500V±10%</td><td>1000V±10%</td></tr>
<tr><td rowspan="2">量程</td><td></td><td>0.1～20MΩ</td><td>0.1～50 MΩ</td><td>0.1～100 MΩ</td></tr>
<tr><td></td><td>20～500 MΩ</td><td>50～1000 MΩ</td><td>100～2000 MΩ</td></tr>
</table>
④ 将仪表的 L 端、E2 或 E1 端的测量线的探针与被测物的连接。
⑤ 按下“PUSH”键进行测量。测量过程中，不要松开“PUSH”键，此时显示器的数值会有变化，待稳定后开始读数。
⑥ 读数。读数时要注意，显示器左下角为当前的测试电压，中间为测量的阻值，右下角为阻值的单位。读数完毕，松开“PUSH”键。
在测量时，如发现显示器显示“1”表示测量值超出量程，可换高量程（按下“RANGE”开关）挡重新测量。
</td></tr>
</table>

第 3 章

电感器和电容器



问：老师，能不能简单介绍一下电感器和电容器？

答：电感器是由导线绕制而成的，其功能主要有“通直阻交”。

电容器是由两块相距很近且相互绝缘的导电极板构成的，其功能主要有“通交隔直”。



3.1 电 感 器

3.1.1 外形与符号

将导线在绝缘支架上绕制一定的匝数（圈数）就构成了电感器。常见的电感器的实物外形如图 3-1（a）所示，根据绕制支架的不同，电感器可分为空心电感器（无支架）、磁芯电感器（磁性材料支架）和铁芯电感器（硅钢片支架），它们的电路符号如图 3-1（b）所示。

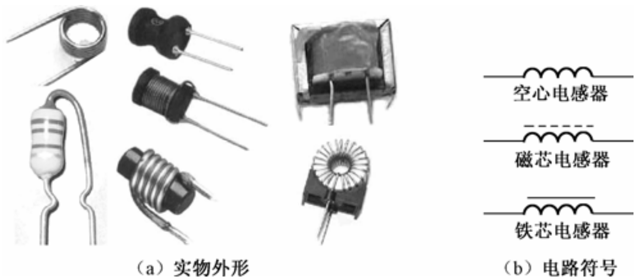


图 3-1 电感器

3.1.2 主要参数与标注方法

1．主要参数

电感器的主要参数有电感量、误差、品质因数和额定电流等。电感器主要参数说明见表 3-1。

表 3-1 电感器主要参数说明

主要参数	说 明
电感量	电感器由线圈组成，当电感器通过电流时会产生磁场，电流越大，产生的磁场越强，穿过电感器的磁场（称为磁通量Φ）就越大。**实验证明，通过电感器的磁通量Φ与通入的电流 I 成正比关系。磁通量Φ与电流 I 的比值称为自感系数，又称电感量 L**，用公式表示就是： $L=\frac{\Phi}{I}$ **电感量的基本单位为亨利（简称亨），用字母“H”表示**，此外还有毫亨（mH）和微亨（μH），它们之间的关系是： $1\text{H}=10^3\text{mH}=10^6\mu\text{H}$ **电感器的电感量大小主要与线圈的匝数（圈数）、绕制方式和磁芯材料等有关。**线圈匝数越多、绕制的线圈越密集，电感量就越大；有磁芯的电感器比无磁芯的电感量大；电感器的磁芯磁导率越高，电感量也就越大。
误差	**误差是指电感器上标称电感量与实际电感量的差距。**对于精度要求高的电路，电感器的允许误差范围通常为±0.2%～±0.5%，一般的电路可采用误差为±10%～15%的电感器。

续表

主要参数	说　　明
品质因数（Q 值）	品质因数也称 Q 值，是衡量电感器质量的主要参数。**品质因素是指当电感器两端加某一频率的交流电压时，其感抗 X_L 与直流电阻 R 的比值。**用公式表示： $Q=\dfrac{X_L}{R}$ 从上式可以看出，感抗越大或直流电阻越小，Q 值就越大。电感器对交流信号的阻碍称为感抗 X_L，其单位为欧姆（Ω）。电感器的感抗大小与电感量有关，电感量越大，感抗越大。 提高品质因素既可通过提高电感器的电感量实现，也可以通过减小电感器线圈的直流电阻来实现。例如粗线圈绕制而成的电感器，直流电阻较小，其 Q 值高；有磁芯的电感器比空芯电感器的电感量大，其 Q 值也高。

2．参数标注方法

电感器通常采用直标法在外壳上标注电感量、误差和额定电流值。图 3-2 列出了几个采用直标法标注的电感器。

在标注电感量时，通常会将电感量值及单位直接标出。在标注误差时，分别用 I 、II 、III 表示±5%、±10%、±20%。在标注额定电流时，用 A、B、C、D、E 分别表示 50mA、150mA 、300mA、0.7A 和 1.6A。

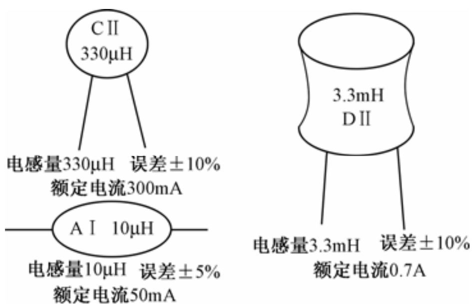


图 3-2　采用直标法标注的电感器

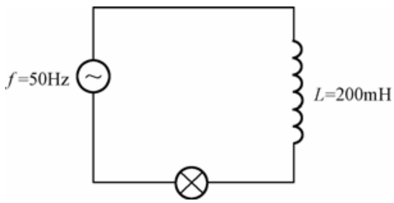
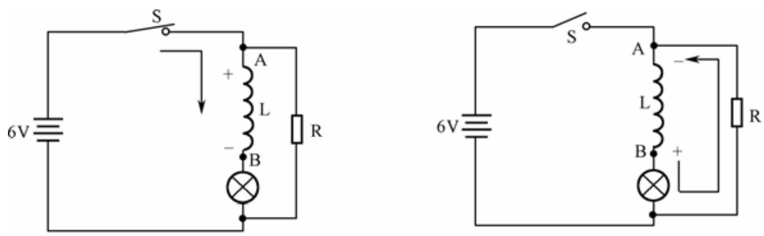
3.1.3　性质

电感器的主要性质有“通直阻交”和“阻碍变化的电流”。电感器主要性质说明见表 3-2。

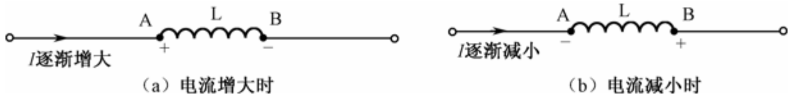
表 3-2　电感器主要性质说明

性质	说　　明
通直阻交	**电感器的“通直阻交”是指电感器对通过的直流信号阻碍很小，直流信号可以很容易通过电感器，而交流信号通过时会受到较大的阻碍。** **电感器对通过的交流信号有较大的阻碍，这种阻碍称为感抗，感抗用 X_L 表示，感抗的单位是**欧姆（Ω）。电感器的感抗大小与自身的电感量和交流信号的频率有关，感抗大小可以用以下公式计算 $X_L=2\pi fL$

续表

性质	说　　明
	X_L 表示感抗，单位为Ω；f 表示交流信号的频率，单位为 Hz；L 表示电感器的电感量，单位为 H。 由上式不难看出：交流信号的频率越高，电感器对交流信号的感抗越大；电感器的电感量越大，对交流信号感抗也越大。 举例：在如图 1 所示的电路中，交流信号的频率为 50Hz，电感器的电感量为 200mH，那么电感器对交流信号的感抗就为： $X_L=2\pi fL=2\times3.14\times50\times200\times10^{-3}=62.8$（Ω）  图 1　感抗计算例图
阻碍变化的电流	**当变化的电流流过电感器时，电感器会产生自感电动势来阻碍变化的电流。**下面以如图 2 所示的两个电路来说明电感器这个性质。  （a）开门闭合，灯泡慢慢变亮　　（b）开关断开，灯泡慢慢熄灭 图 2　电感器“阻碍变化的电流”说明图 在图 2（a）中，当开关 S 闭合时，会发现灯泡不是马上亮起来，而是慢慢亮起来。这是因为当开关闭合后，有电流流过电感器，这是一个增大的电流（从无到有），电感器马上产生自感电动势来阻碍电流增大，其极性是 A 正 B 负，该电动势使 A 点电位上升，电流从 A 点流入较困难，也就是说电感器产生的这种电动势对电流有阻碍作用。由于电感器产生 A 正 B 负自感电动势的阻碍，流过电感器的电流不能一下子增大，而是慢慢增大，所以灯泡慢慢变亮，当电流不再增大（即电流大小恒定）时，电感器上的电动势消失，灯泡亮度也就不变了。 如果将开关 S 断开，如图 2（b）所示，会发现灯泡不是马上熄灭，而是慢慢暗下来。这是因为当开关断开后，流过电感器的电流突然变为 0，也就是说，流过电感器的电流突然变小（从有到无），电感器马上产生 A 负 B 正的自感电动势，由于电感器、灯泡和电阻器 R 连接成闭合回路，电感器的自感电动势会产生电流流过灯泡，电流方向是：电感器 B 正→灯泡→电阻器 R→电感器 A 负。开关断开后，该电流维持灯泡继续发光，随着电感器上的电动势的消耗而慢慢降低，流过灯泡的电流也慢慢减小，灯泡也就慢慢变暗，最后熄灭。 从上面的电路分析可知，只要流过电感器的电流发生变化（不管是增大还是减小），电感器都会产生自感电动势，电动势的方向总是阻碍电流的变化。 电感器这个性质非常重要，在以后的电路分析中经常要用到该性质。为了让大家能够更透彻地理解电感器这个性质，再来看图 3 中的两个例子。

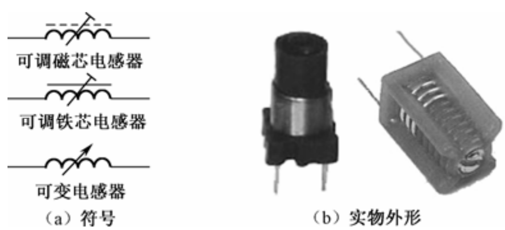
续表

性质	说　　明
	 图 3　电感器性质解释图 在图 3（a）中，流过电感器的电流是逐渐增大的，电感器会产生 A 正 B 负的电动势阻碍电流增大（理解为 A 点为正，A 点电位升高，电流通过较困难）；在图 3（b）中，流过电感器的电流是逐渐减小的，电感器会产生 A 负 B 正的电动势阻碍电流减小（理解为 A 点为负时，A 点电位低，吸引电流流过来，阻碍它减小）。

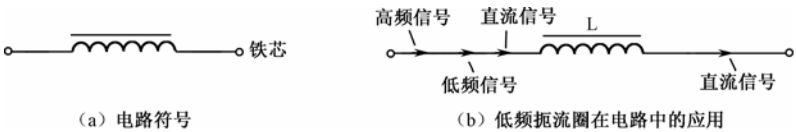
3.1.4　种类

电感器种类较多，表 3-3 介绍了几种较典型的电感器。

表 3-3　几种较典型的电感器

类型	说　　明
可调电感器	**可调电感器是指电感量可以调节的电感器。**可调电感器电路符号如图 1（a）所示，常见的可调电感器实物外形如图 1（b）所示。  图 1　可调电感器 可调电感器是通过调节磁芯在线圈中的位置来改变电感量，磁芯进入线圈内部越多，电感器的电感量就越大。如果电感器没有磁芯，可以通过减少或增多线圈的匝数来降低或提高电感器的电感量，另外，改变线圈之间的疏密程度也能调节电感量。
高频扼流圈	**高频扼流圈又称高频阻流圈，它是一种电感量很小的电感器，常用在高频电路中，**其电路符号如图 2（a）所示。  图 2　高频扼流圈 高频扼流圈又分为空心和磁芯，空心高频扼流圈多用较粗铜线或镀银铜线绕制而成，可以通过改变匝数或匝距来改变电感量；磁芯高频扼流圈用铜线在磁芯材料上绕制一定的匝数构成，其电感量可以通过调节磁芯在线圈中的位置来改变。 高频扼流圈在电路中的作用是“阻高频，通低频”。如图 2（b）所示，当高频扼流圈输入高、低频信号和直流信号时，高频信号不能通过，只有低频和直流信号能通过。

续表

类型	说　　明
低频扼流圈	**低频扼流圈又称低频阻流圈，是一种电感量很大的电感器，常用在低频电路（如电源电路）中，**其电路符号如图 3（a）所示。  （a）电路符号　（b）低频扼流圈在电路中的应用 图 3　低频扼流圈 低频扼流圈是用较细的漆包线在铁芯（硅钢片）或铜芯上绕制很多匝数制成的。低频扼流圈在电路中的作用是“通直流，阻低频”。如图 3（b）所示，当低频扼流圈输入高、低频和直流时，高、低频信号均不能通过，只有直流信号才能通过。

3.1.5　检测

电感器的电感量和 *Q* 值一般用专门的电感测量仪和 Q 表来测量，一些功能齐全的万用表也具有电感量测量功能。

电感器常见的故障有开路和线圈匝间短路。电感器实际上就是线圈，由于线圈的电阻一般比较小，测量时一般用万用表的 R×1Ω挡，电感器的检测如图 3-3 所示。

线径粗、匝数少的电感器电阻小，接近于 0Ω，线径细、匝数多的电感器阻值较大。在测量电感器时，万用表可以很容易检测出是否开路（开路时测出的电阻为无穷大），但很难判断它是否匝间短路，因为电感器匝间短路时电阻减小很少。其解决方法是：当怀疑电感器匝数有短路，而万用表又无法检测出来时，可更换新的同型号电感器，故障排除则说明原电感器已损坏。

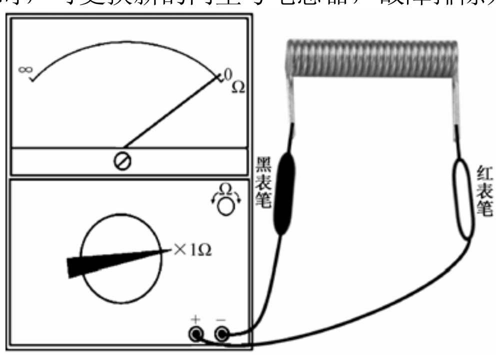


图 3-3　电感器的检测

3.2　电　容　器

3.2.1　结构、外形与符号

电容器是一种可以存储电荷的元器件。相距很近且中间有绝缘介质（如空气、纸和陶瓷

等）的两块导电极板就构成了电容器。电容的结构，外形与电路符号如图 3-4 所示。

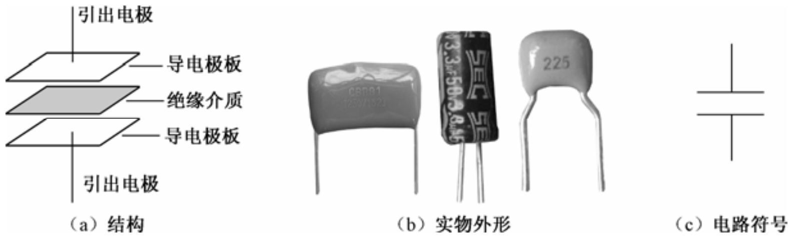


图 3-4　电容器

3.2.2　主要参数

电容器主要参数有标称容量、允许误差、额定电压和绝缘电阻等。电容器主要参数说明见表 3-4 。

表 3-4　电容器主要参数说明

主要参数	说　　明
容量与允许误差	**电容器能存储电荷，其存储电荷的多少称为容量。**这一点与蓄电池类似，不过蓄电池存储电荷的能力比电容器大得多。电容器的容量越大，存储的电荷就越多。**电容器的容量大小与下面的因素有关：** **①两导电极板相对面积。**相对面积越大，容量越大。 **②两极板之间的距离。**极板相距越近，容量越大。 **③两极板中间的绝缘介质。**在极板相对面积和距离相同的情况下，绝缘介质不同的电容器，其容量不同。 电容器容量的单位有法拉（F）、毫法（mF）、微法（μF）、纳法（nF）和皮法（pF），它们的关系是 $1F=10^3mF=10^6\mu F=10^9nF=10^{12}pF$ **标注在电容器上的容量称为标称容量。允许误差是指电容器标称容量与实际容量之间允许的最大误差范围。**
额定电压	**额定电压又称电容器的耐压值，它是指在正常条件下电容器长时间使用两端允许承受的最高电压。**一旦加到电容器两端的电压超过额定电压，两极板之间的绝缘介质容易被击穿而失去绝缘能力，造成两极板短路。
绝缘电阻	**电容器两极板之间隔着绝缘介质，绝缘电阻用来表示绝缘介质的绝缘程度。**绝缘电阻越大，表明绝缘介质绝缘性能越好，如果绝缘电阻比较小，绝缘介质绝缘性能下降，就会出现一个极板上的电流会通过绝缘介质流到另一个极板上，这种现象称为漏电。由于绝缘电阻小的电容器存在着漏电，故不能继续使用。 **一般情况下，无极性电容器的绝缘电阻为无穷大，而有极性电容器（电解电容器）绝缘电阻很大，但一般达不到无穷大。**

3.2.3　性质

电容器的性质主要有“充电”、“放电”和“隔直”、“通交”。

1．电容器的“充电”和“放电”性质

“充电”和“放电”是电容器非常重要的性质，下面以图 3-5 所示的电路来说明该性质。

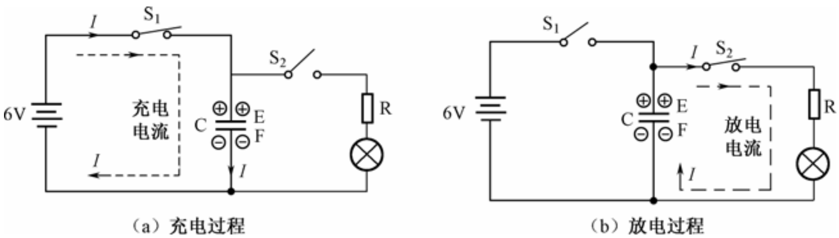


图 3-5　电容充、放电说明

（1）充电

在如图 3-5（a）所示的电路中，当开关 S_1 闭合后，从电源正极输出电流经开关 S_1 流到电容器的金属极板 E 上，在极板 E 上聚集了大量的正电荷，由于金属极板 F 与极板 E 相距很近，又因为同性相斥，所以极板 F 上的正电荷受到很近的极板 E 上的正电荷排斥而流走，这些正电荷汇合形成电流到达电源的负极，极板 F 上就剩下很多负电荷，结果在电容器的上、下极板就存储了大量的上正下负的电荷。（注：金属极板 E、F 常态时不呈电性，但两极板上都有大量的正负电荷，只是正负电荷数相等）

电源输出电流流经电容器，在电容器上获得大量电荷的过程称为电容器的“充电”。

（2）放电

在如图 3-5（b）所示的电路中，先闭合开关 S_1，让电源对电容器 C 充上正下负的电荷，然后断开 S_1，再闭合开关 S_2，电容器上的电荷开始释放。电荷释放途径是：电容器极板 E 上的正电荷流出，形成电流→开关 S_2→电阻 R→灯泡→极板 F，中和极板 F 上的负电荷。大量的电荷移动形成电流，该电流经灯泡，灯泡发光。随着极板 E 上的正电荷不断流走，正电荷的数量慢慢减少，流经灯泡的电流减少，灯泡慢慢变暗，当极板 E 上先前充得的正电荷全放完后，无电流流过灯泡，灯泡熄灭，此时极板 F 上的负电荷也完全被中和，电容器两极板上先前充得的电荷消失。

电容器一个极板上的正电荷经一定的途径流到另一个极板，中和该极板上的负电荷的过程称为电容器的“放电”。

电容器充电后两极板上储存了电荷，两极板之间也就有了电压，这就像杯子装水后有水位一样。电容器极板上的电荷数与两极板之间的电压有一定的关系，具体可这样概括：**在容量不变的情况下，电容器存储的电荷数与两端电压成正比**，即：

$$Q=C \cdot U$$

Q 表示电荷数（单位：库仑），C 表示容量（单位：法拉），U 表示电容器两端的电压（单位：伏特）。

这个公式可以从以下几个方面来理解：

① 在容量不变的情况下（C 不变），电容器充的电荷越多（Q 增大），两端电压越高（U 增大）。就像杯子大小不变时，杯子中装的水越多，杯子的水位越高一样。

② 若向容量一大一小的两只电容器充相同数量的电荷（Q 不变），那么容量小的电容器两

端的电压更高（C 小 U 大）。这就像往容量一大一小的两只杯子装入同样多的水时，小杯子中的水位更高一样。

2. 电容器的“隔直”和“通交”性质

电容器的“隔直”和“通交”是指直流电不能通过电容器，而交流电可以通过电容器。下面以如图 3-6 所示的电路来说明电容器的“隔直通交”性质。

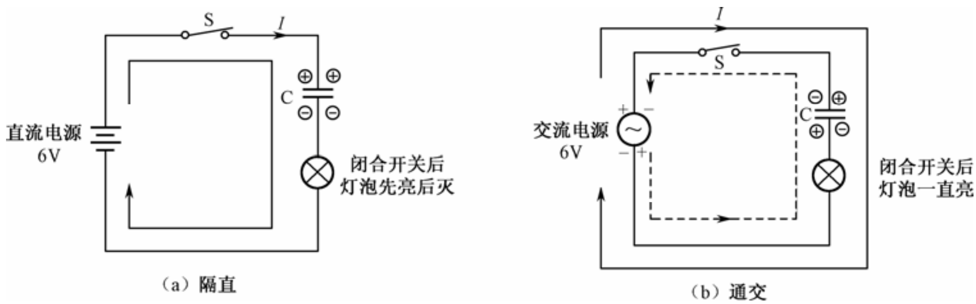


图 3-6　电容器的“隔直通交”性质说明

（1）隔直

在如图 3-6（a）所示的电路中，电容器与直流电源连接，当开关 S 闭合后，直流电源开始对电容器充电，充电途径是：电源正极→开关 S→电容器上极板获得大量正电荷→通过电荷的排斥作用（电场作用），下极板上的大量正电荷被排斥流出形成电流→灯泡→电源的负极，有电流流过灯泡，灯泡亮。随着电源对电容器不断充电，电容器两端电荷越来越多，两端电压越来越高，当电容器两端电压与电源电压相等时，电源不能再对电容器充电，无电流流到电容器上极板，下极板也就无电流流出，无电流流过灯泡，灯泡熄灭。

以上过程说明：**在刚开始时直流可以对电容器充电而通过电容器，该过程持续时间很短，充电结束后，直流就无法通过电容器，这就是电容器的“隔直”性质。**

（2）通交

在如图 3-6（b）所示的电路中，电容器与交流电源连接，通过第 1 章学习的知识可知，交流电的极性是经常变化的，故图 3-6（b）中的交流电源的极性也是经常变化的，一段时间极性是上正下负，下一段时间极性变为下正上负。开关 S 闭合后，当交流电源的极性是上正下负时，交流电源从上端输出电流，该电流对电容器充电，充电途径是：交流电源上端→开关 S→电容器→灯泡→交流电源下端，有电流流过灯泡，灯泡发光，同时交流电源对电容器充得上正下负的电荷；当交流电源的极性变为上负下正时，交流电源从下端输出电流，它经过灯泡对电容反充电，电流途径是：交流电源下端→灯泡→电容器→开关 S→交流电源上端，有电流流过灯泡，灯泡发光，同时电流对电容器反充上负下正的电荷，这次充得的电荷极性与先前充得的电荷极性相反，它们相互中和抵消，电容器上的电荷消失。当交流电源极性重新变为上正下负时，又可以对电容器进行充电，以后不断重复上述过程。

从上面的分析可以看出，**由于交流电源的极性不断变化，使得电容器充电和反充电（中和抵消）交替进行，从而始终有电流流过电容器，这就是电容器的“通交”性质。**

（3）电容器对交流有阻碍作用

电容器虽然能通过交流，但对交流有一定的阻碍，这种阻碍称之为容抗，用 X_C 表示，容

抗的单位是欧姆（Ω）。在如图 3-7 所示的电路中，两个电路中的交流电源电压相等，灯泡也一样，但由于电容器的容抗对交流阻碍有一定的阻碍作用，故图 3-7（b）中的灯泡要暗一些。



（a）无电容器　　（b）有电容器

图 3-7　容抗说明图

电容器的容抗与交流信号频率、电容器的容量有关，交流信号频率越高，电容器对交流信号的容抗越小，电容器容量越大，它对交流信号的容抗越小。在如图 3-7（b）所示电路中，若交流电频率不变，当电容器容量越大，灯泡越亮；或者电容器容量不变，交流电频率越高灯泡越亮。这种关系可用下式表示：

$$X_C=\frac{1}{2\pi fC}$$

X_C 表示容抗，f 表示交流信号频率，π为常数 3.14。

在如图 3-7（b）所示的电路中，若交流电源的频率 f=50Hz，电容器的容量 C=100μF，那么该电容器对交流电的容抗为：

$$X_C=\frac{1}{2\pi fC}=\frac{1}{2\times3.14\times50\times100\times10^{-6}}\approx31.8\Omega$$

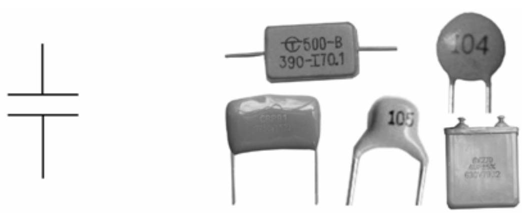
3.2.4　种类

电容器种类很多，主要可分为两大类：固定电容器和可变电容器。

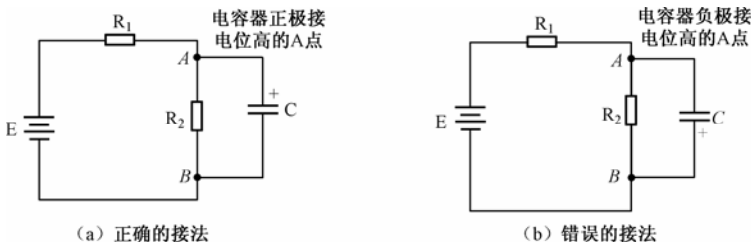
1. 固定电容器

固定电容器是指容量固定不变的电容器。固定电容器可分为无极性电容器和有极性电容器。固定电容器说明见表 3-5。

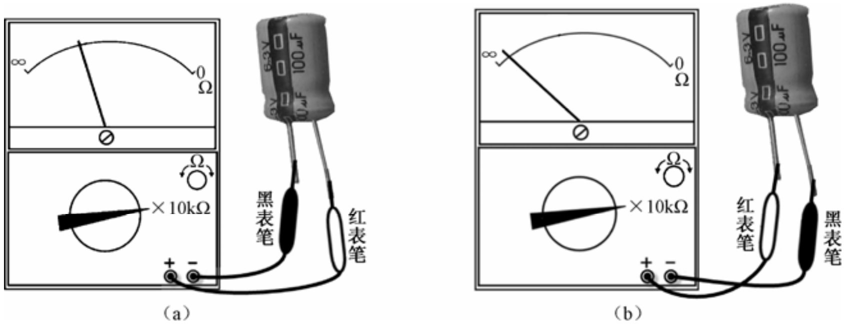
表 3-5　固定电容器说明

类型	说　　明
无极性电容器	**无极性电容器的引极无正、负极之分**，其电路符号如图 1（a）所示，常见无极性电容器外形如图 1（b）所示。无极性电容器的容量小，但耐压高。  （a）电路符号　　（b）外形 图 1　无极性电容器

续表

类型	说　　明
有极性电容器	**有极性电容器又称电解电容器，引脚有正、负之分。**有极性电容器的电路符号如图2（a）所示，常见有极性电容器外形如图2（b）所示。有极性电容器的容量大，但耐压较低。  图2　有极性电容器 有极性电容器引脚有正负之分，在电路中不能乱接，若正负极接错，轻则电容器不能正常工作，重则电容器炸裂。**有极性电容器正确的连接方法是：电容器正极接电路中的高电位，负极接电路中的低电位。**有极性电容器正确和错误的接法分别如图3所示。  图3　有极性电容器的连接方法 有极性电容器的极性判别： 由于有极性电容器有正负之分，在电路中又不能乱接，所以在使用有极性电容器前需要判别出正、负极。有极性电容器的正、负极判别方法如下。 方法一：对于未使用过的新电容，可以根据引脚长短来判别。引脚长的为正极，引脚短的为负极，如图4所示。 方法二：根据电容器上标注的极性判别。电容器上标“＋”为正极，标“－”为负极，如图5所示。  图4　根据引脚长短来判别正负极  图5　根据标注判别正负极 方法三：用万用表判别。万用表拨至R×10kΩ挡，测量电容器两极之间阻值，正反各测一次，每次测量时表针都会先向右摆动，然后慢慢往左返回，待表针稳定不移动后再观察阻值大小，两次测量会出现阻值一大一小，以阻值大的那次为准，如图6（b）所示，黑表笔接的为正极，红表笔接的为负极。

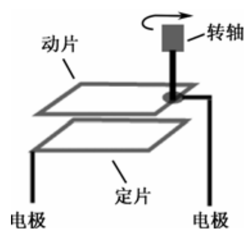
续表

类型	说明
	 图 6　用万用表检测有极性电容器的正负极

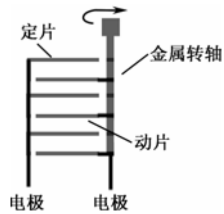
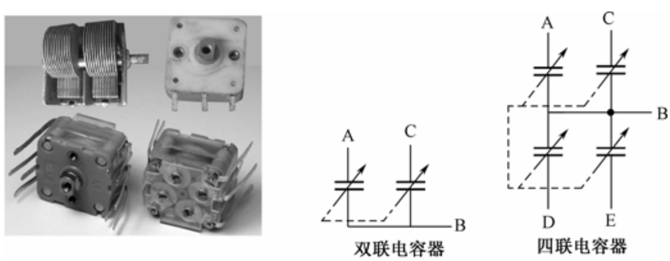
2. 可变电容器

可变电容器又称可调电容器，是指容量可以调节的电容器。可变电容器可分为微调电容器、单联电容器和多联电容器等。可变电容器说明见表 3-6。

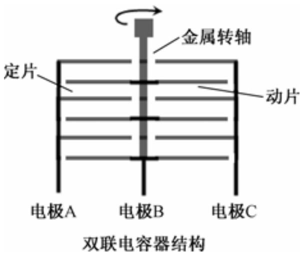
表 3-6　可变电容器说明

类型	说明
微调电容器	**微调电容器又称半可变电容器，通常是指不带调节手柄的可变电容器。** ①外形与符号 微调电容器的外形和电路符号如图 1 所示。  图 1　微调电容器 ②结构原理 微调电容器是由一片动片和一片定片构成的。微调电容器典型结构示意图如图 2 所示，动片与转轴连接在一起，当转动转轴时，动片也随之转动，动、定片的相对面积就会发生变化，电容器的容量就会变化。  图 2　微调电容器的结构示意图

续表

类型	说　　明
单联电容器	**单联电容器是由多个连接在一起的金属片作定片、以多个与金属转轴连接的金属片作动片构成的。** ①外形与符号 单联电容器的外形和符号如图 3 所示。  （a）外形　　（b）符号 图 3　单联电容器 ②结构原理 单联电容器的结构如图 4 所示，它是以多个有连接的金属片作定片，而将多个与金属转轴连接的金属片作动片，定片与动片的金属片交差且相互绝缘叠在一起，当转动转轴时，各个定片与动片之间的相对面积就会发生变化，整个电容器的容量就会发生变化。  图 4　单联电容器的结构示意图
多联电容器	**多联电容器是指将两个或两个以上可变电容器结合在一起并且可同时调节的电容器。** ①外形与符号 常见的多联电容器有双联电容器和四联电容器，多联电容器的外形和符号如图 5 所示。  （a）外形　　（b）符号 图 5　多联电容器 ②结构原理 多联电容器虽然种类较多，但结构大同小异，下面以双联电容器为例进行说明。双联电容器的结构如图 6 所示，双联电容器由两组动片和两组定片构成，两组动片都与金属转轴相连，而各组定片都是独立的，当转动转轴时，与转轴连动的两组动片都会移动，它们与各自对应定片的相对面积会同时发生变化，两个电容器的容量被同时调节。

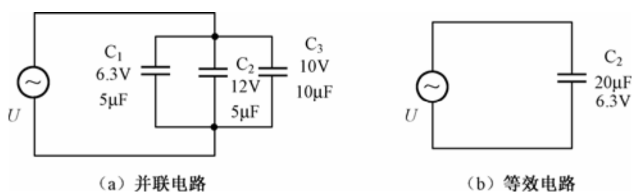
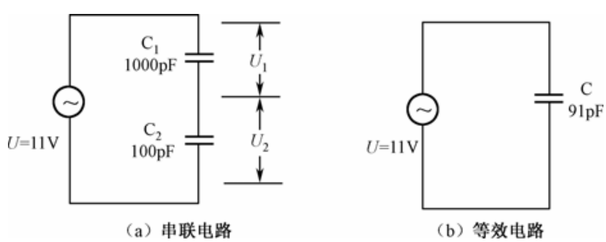
续表

类型	说　　明
	 图 6　双联电容器的结构示意图

3.2.5　电容器的串联与并联

在使用电容器时，如果无法找到合适容量或耐压的电容器，可将多个电容器并联或串联来得到需要的电容器。电容器的并联和串联说明见表 3-7。

表 3-7　电容器的并联和串联说明

关键点	说　　明
电容器的并联	**电容器并联是指两个或两个以上电容器头头相连，尾尾相接。**电容器的并联如图 1 所示。  图 1　电容器的并联 **电容器并联后的总容量增大，总容量等于所有并联电容器的容量之和，**以图 1（a）电路为例，并联后总容量： $$C=C_1+C_2+C_3=5+5+10=20\mu F$$ **电容器并联后的总耐压以耐压最小的电容器的耐压为准，**仍以图 1（a）电路为例，C_1、C_2、C_3 耐压不同，其中 C_1 的耐压最小，故并联后电容器的总耐压以 C_1 耐压 6.3V 为准，加在并联电容器两端的电压不能超过 6.3V。 根据上述原则，图 1（a）的电路可等效为图 1（b）所示的电路。
电容器的串联	**两个或两个以上的电容器在电路中头尾相连就是电容器的串联。**电容器的串联如图 2 所示。  图 2　电容器的串联

续表

关键点	说　　明
	电容器串联后总容量减小，总容量比容量最小的电容器的容量还小。电容器串联后总容量的计算规律是：总容量的倒数等于各电容器容量倒数之和，这与电阻器的并联计算相同。以如图 2（a）电路为例，电容器串联后的总容量计算公式是： $$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}\Rightarrow C=\frac{C_1\cdot C_2}{C_1+C_2}=\frac{1000\times100}{1000+100}=91\text{pF}$$ 所以图 2（a）电路与图 2（b）电路是等效的。 **电容器串联后总耐压增大，总耐压较耐压最低电容器的耐压要高。在电路中，串联的各电容器两端承担的电压与容量成反比**，即容量越大，在电路中承担电压越低，这个关系可用以下公式表示： $$\frac{C_1}{C_2}=\frac{U_2}{U_1}$$ 以图 2（a）所示电路为例，C_1 的容量是 C_2 容量的 10 倍，用上述公式计算可知，C_2 两端承担的电压 U_2 应是 C_1 两端承担电压 U_1 的 10 倍，如果交流电压为 11V，则 U_1=1V，U_2=10V，若 C_1、C_2 都是耐压为 6.3V 的电容器，就会出现 C_2 首先被击穿短路（因为它两端承担了 10V 电压），11V 电压马上全部加到 C_1 两端，接着 C_1 被击穿损坏。 当电容器串联时，容量小的电容器的耐压应尽量选高，以接近或等于电源电压为佳，因为当电容器串联在电路中时，容量小的电容器在电路中承受的电压比容量大的电容器承担电压大得多。

3.2.6　容量与误差的标注方法

1. 容量的标注方法

电容器容量标注方法很多，下面介绍一些常用的容量标注方法。电容器容量标注方法说明见表 3-8。

表 3-8　电容器容量标注方法说明

容量标注法	说　　明
直标法	**直标法是指在电容器上直接标出容量值和容量单位。** 电解电容器（有极性电容器）常采用直标法，图 1 左方的电容器的容量为 2200μF，耐压为 63V，误差为±20%，右方电容器的容量为 68nF，J 表示误差为±5%。  图 1　直标法标注容量的电容器
小数点标注法	**容量较大的无极性电容器常采用小数点标注法。小数点标注法的容量单位是μF。** 图 2 中的两个实物电容器的容量分别是 0.01μF 和 0.033μF。 有的电容器用μ、n、p 来表示小数点，同时指明容量单位，如图中的 p1、4n7、3μ分别表示容量 0.1pF、4.7nF、3.3μF，如果用 R 表示小数点，单位则为μF，如 R47 表示容量是 0.47μF。

续表

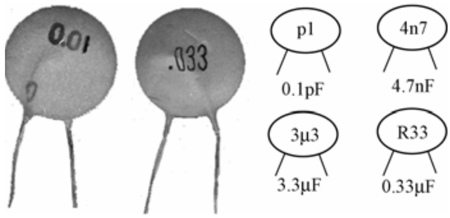
<table>
<tr><th>容量标注法</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td></td><td>

图 2　小数点标注法标注容量的电容器</td></tr>
<tr><td>整数标注法</td><td>容量较小的无极性电容器常采用整数标注法，单位为 pF。
若整数末位是 0，如标“330”，则表示该电容器容量为 330pF；若整数末位不是 0，如标“103”，则表示容量为 10×10^{3}pF。图 3 中的几个电容器的容量分别是 180pF、330pF 和 22000pF。如果整数末尾是 9，不是表示 10^{9}，而是表示 10^{-1}，如 339 表示 3.3pF。

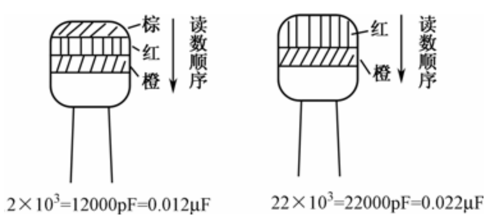

图 3　整数标注法标注容量的电容器</td></tr>
<tr><td>色码标注法</td><td>色码表示法是指用不同颜色的色环、色带或色点表示容量大小的方法，色码标注法的单位为 pF。
电容器的色码表示方法与色环电阻器相同，第 1、2 色码分别表示第一、二位有效数，第 3 色码表示倍乘数，第 4 色码表示误差数，具体各色环代表的数值可查阅色环电阻器色环含义表。
在图 4 中，左方的电容器往引脚方向，色码依次为“棕红橙”，表示容量为 12×10^{3}pF =12000pF=0.012μF，右方的电容器只有两条色码“红橙”，较宽的色码要当成两条相同的色码，该电容器的容量为 22×10^{3}=22000pF=0.022μF。


图 4　色码标注法标注容量的电容器</td></tr>
</table>

2. 误差表示法

电容器常见的误差表示方法主要有罗马数字表示法、字母表示法和直接表示法。电容器误差表示法说明见表 3-9。

表 3-9　电容器误差表示法说明

<table>
<tr><td>误差表示法</td><td>说　　明</td></tr>
<tr><td>罗马数字表示法</td><td>罗马数字表示法是在电容器上标注罗马数字来表示误差大小。这种方法用 0、Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ分别表示误差±2%、±5%、±10%和±20%</td></tr>
<tr><td>字母表示法</td><td>字母表示法是在电容器上标注字母来表示误差的大小。字母及其代表的误差数见下表。例如某电容器上标注“K”，表示误差为±10%，标注“Z”表示正误差为 80%，负误差为 20%。
<table>
<tr><td>字母</td><td>B</td><td>C</td><td>D</td><td>F</td><td>G</td><td>J</td><td>K</td><td>M</td><td>N</td><td>Q</td><td>S</td><td>Z</td><td>P</td></tr>
<tr><td>误差（%）</td><td>±0.1</td><td>±0.25</td><td>±0.5</td><td>±1</td><td>±2</td><td>±5</td><td>±10</td><td>±20</td><td>±30</td><td>±30～−10</td><td>±50～−20</td><td>+80～−20</td><td>+100～−0</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>直接表示法</td><td>直接表示法是指在电容器上直接标出误差数值。如标注“68pF±5pF”表示误差为±5pF，标注“±20%”表示误差为±20%，标注“0.033/5”表示误差为±5%（%号被省掉）。</td></tr>
</table>

3.2.7　常见故障及检测

电容器常见的故障有开路、短路和漏电。电容器的检测说明见表 3-10。

表 3-10　电容器的检测说明

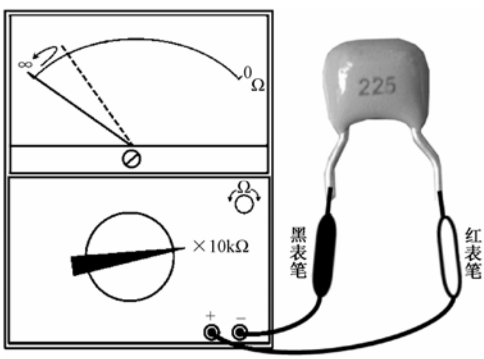
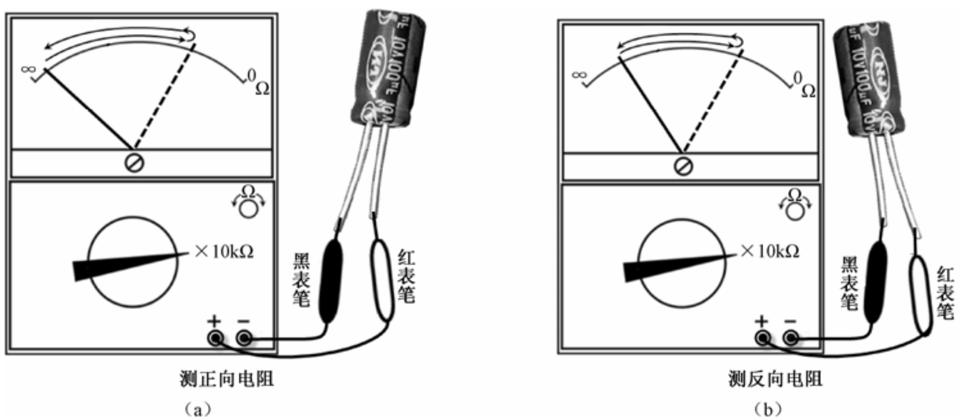
<table>
<tr><td>关键点</td><td>说　　明</td></tr>
<tr><td>无极性电容器的检测</td><td>检测时，万用表拨至 R×10kΩ挡，测量电容器两引脚之间的阻值，测量过程如图 1 所示。
如果电容器正常，表针先往右摆动到一定的位置，然后慢慢返回到无穷大处，容量越小向右摆动的幅度越小。表针摆动过程实际上就是万用表内部电池通过表笔对被测电容器充电的过程，被测电容器容量越小充电越快，表针摆动幅度越小，充电完成后表针就停在无穷大处。
若检测时表针始终停在无穷大处不动，说明电容器不能充电，该电容器开路。
若表针能往右摆动，也能返回，但回不到无穷大，说明电容器能充电，但绝缘电阻小，该电容器漏电。
若表针始终指在阻值小或 0 处不动，这说明电容器不能充电，并且绝缘电阻很小，该电容器短路。
注：对于容量小于 0.01μF 的电容器，由于容量小、充电快，在测量时表针可能来不及摆动，这样容易将正常电容器误认为开路，故用万用表无法判断小容量电容器是否开路，但可以判别是否短路和漏电。如果怀疑小容量电容器可能开路，可找相同容量的电容器代换，如果故障消失，就说明原电容器开路。


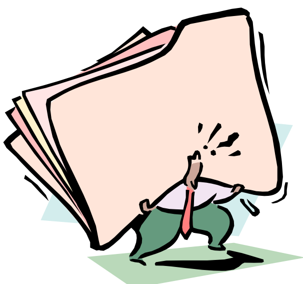
图 1　无极性电容器的检测</td></tr>
</table>

续表

关键点	说　　明
有极性电容器的检测	万用表拔至 R×1kΩ或 R×10kΩ挡（对于容量很大的电容器，可选择 R×100Ω挡），测量有极性电容器正、反向电阻，测量过程如图 2 所示。 如果电容器正常，在测正向电阻（黑表笔接电容器正极引脚，红表笔接负引脚）时，表针先向右做大幅度摆动，然后慢慢返回到无穷大处（用 R×10kΩ挡测可能到不了无穷大处，但非常接近也是正常的），如图 2（a）所示；在测反向电阻时，表针也是先向右摆动，也能返回，但一般回不到无穷大处，如图 2（b）所示。即电解电容器的正向电阻大，反向电阻小，它的检测过程与判别正负极是一样的。 若正、反向电阻均为无穷大，表明电容器开路。 若正、反向电阻都很小，说明电容器漏电。 若正、反向电阻均为 0，说明电容器短路。  图 2　有极性电容器的检测

第 4 章

变　压　器



问：老师，变压器是一种升降电压的电气设备吧？

答：对，变压器不但能升降电压，还可以改变电流的大小。



4.1 变压器的基础知识

变压器是一种能提升或降低交流电压、电流的电气设备。无论在电力系统，还是微电子技术领域，变压器都得到了广泛的应用。

4.1.1 结构

变压器主要是由线圈和铁芯组成的，其结构与符号如图 4-1 所示。

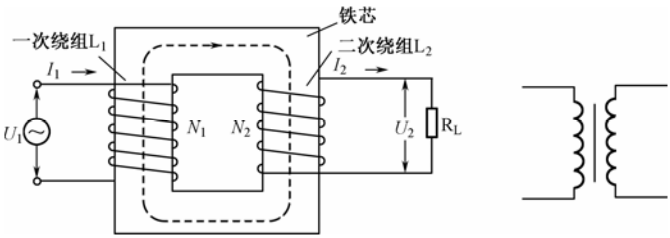


图 4-1 变压器的结构与符号

从图 4-1 中可以看出，两组线圈 L_1、L_2 绕在同一铁芯上就构成了变压器，**一组线圈与交流电源连接，该组线圈称做一次绕组（或称原边绕组、初级绕组）**，匝数（即圈数）为 N_1，**另一组线圈与负载 R_L 连接，称做二次绕组（或称作副边绕组、次级绕组）**，匝数为 N_2。

当交流电压 U_1 加到一次绕组 L_1 两端时，有交流电流 I_1 流过 L_1，L_1 产生变化的磁场，交化的磁场通过铁芯穿过二次绕组 L_2，L_2 两端会产生感应电压 U_2，并输出 I_2 电流流经负载 R_L。

实际的变压器铁芯并不是一块厚厚的环形铁，而是由很多薄薄的、涂有绝缘层的硅钢片叠在一起构成的，常见的硅钢片主要有心式和壳式两种，其形状如图 4-2 所示。由于在闭合的硅钢片上绕制线圈比较困难，所以每片硅钢片都分成两部分，先在其中一部分上绕好线圈，然后再将另一部分与它拼接在一起。

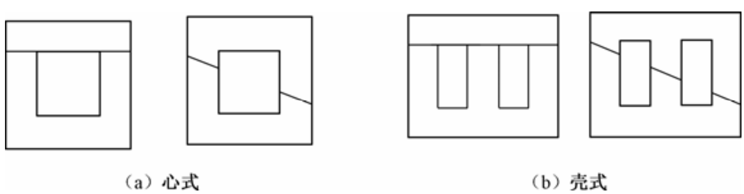


图 4-2 硅钢片的形状

变压器的绕组一般采用表面涂有绝缘漆的铜线绕制而成，对于大容量的变压器则常采用绝缘的扁铜线或铝线绕制而成。**变压器接高压的绕组称为高压绕组，其线径细、匝数多，接低压的绕组称为低压绕组，其线径粗、匝数少。**

变压器是由线圈绕制在铁芯上构成的。对于不同形状的铁芯，线圈的绕制方法有所不同，图 4-3 列出了几种线圈在铁芯上的绕制方式。从图中可以看出，不管是心式铁芯，还是壳式铁芯，高、低压绕组并不是各绕在铁芯的一侧，而是绕在一起，图中线径粗的线圈绕在铁芯上构

成低压绕组，线径细的线圈则绕在低压绕组上。

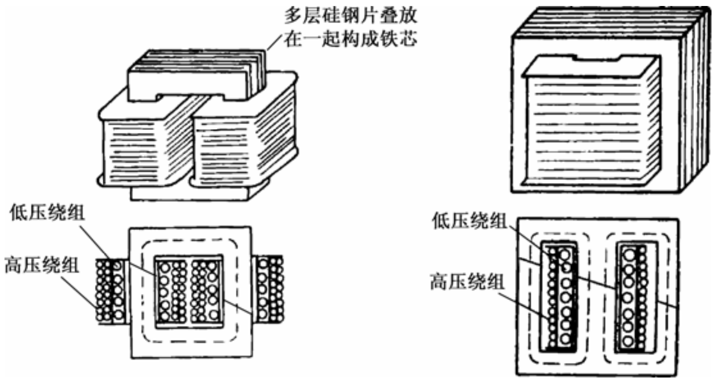


图 4-3　变压器的线圈绕制方式

4.1.2　功能

变压器的基本功能是电压变换和电流变换。变压器基本功能说明见表 4-1。

表 4-1　变压器基本功能说明

<table>
<tr><th>功能</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td>电压变换</td><td>变压器既可以升高交流电压，也能降低交流电压。在忽略变压器对电能损耗的情况下，变压器一次、二次绕组的电压与一次、二次绕组的匝数关系为：
$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{N_1}{N_2}=K$$
式中的 K 称为变比，由上式可知：
①当 $N_1<N_2$（即 $K<1$）时，变压器输出电压 U_2 较输入电压 U_1 高，故 $K<1$ 的变压器称为升压变压器。
②当 $N_1>N_2$（即 $K>1$）时，变压器输出电压 U_2 较输入电压 U_1 低，故 $K>1$ 的变压器称为降压变压器。
③当 $N_1=N_2$（即 $K=1$）时，变压器输出电压 U_2 和输入电压 U_1 相等，这种变压器不能改变交流电压的大小，但能将一次、二组绕组电路隔开，故 $K=1$ 变压器常用做隔离变压器。</td></tr>
<tr><td>电流变换</td><td>变压器不但能改变交流电压的大小，还能改变交流电流的大小。在忽略变压器损耗情况下，变压器的一次绕组的功率 P_1（$P_1=U_1 \cdot I_1$）与二次绕组的功率 P_2（$P_2=U_2 \cdot I_2$）是相等的，即：
$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \Rightarrow \frac{U_1}{U_2}=\frac{I_2}{I_1}$$
由上式可知，变压器一次、二次绕组的电压与一次、二次线圈的电流成反比，若提升了二次绕组的电压，则会使二次绕组的电流减小，若降低二次绕组电压，二次绕组电流会增大。</td></tr>
<tr><td colspan="2">综上所述，对于变压器来说，不管是一次或是二次绕组，只要是匝数越多的绕组，它两端的电压就越高，流过的电流就越小。例如，某变压器的二次绕组匝数少于一次绕组匝数，那么二次绕组两端的电压要低于一次绕组两端的电压，而二次绕组的电流则会比一次绕组的大。</td></tr>
</table>

4.1.3　极性

变压器可以改变交流电的电压或电流大小，但不能改变交流电的频率。当一次绕组的交流电压极性变化时，二次绕组上的交流电压极性也会变化，它们的极性变化有一定的规律。下面以图 4-4 来说明这个问题。

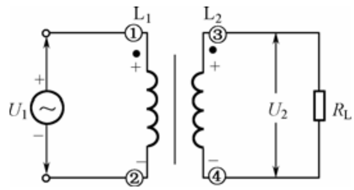


图 4-4　变压器的极性说明

1．同名端

交流电压 U_1 加到变压器的一次绕组 L_1 两端，在二次绕组 U_2 两端会感应出电压 U_2，并送给负载 R_L。假设 U_1 的极性是上正下负，L_1 两端的电压也为①正②负（即上正下负），L_2 两端感应出来的电压有两种可能：一是③正④负，二是③负④正。

如果 L_2 两端的感应电压极性是③正④负，那么 L_2 的③端与 L1 的①端的极性是相同的，那么 L_2 的③端与 L_1 的①端是同名端。**为了表示两者是同名端，常在该端标注“ •”，**当然，因为②端与④端极性也是相同的，故它们也是同名端。

如果 L_2 两端的感应电压极性是③负④正，那么 L_2 的④端与 L_1 的①端的极性是相同的，L_2 的④端与 L1 的①端就是同名端。

2．同名端的判别

根据不同情况，可采用下面的两种方法来判别变压器的同名端。

（1）对于已知绕向的变压器

对于已知绕向的变压器，可分别给两个绕组通电流，然后用右手螺旋定则来判断两个绕组产生磁场的方向，再来确定同名端。

如果电流流过两个绕组，两个绕组产生的磁场方向一致，则两个绕组的电流输入端为同名端。如图 4-5（a）所示，电流 I_1 从①端流入一次绕组 L_1，它产生的磁场方向为顺时针，电流 I_2 从③端流入二次绕组 L_2，L_2 产生的磁场也为顺时针，即两绕组产生的磁场方向一致，两个绕组的电流输入端①、③为同名端。

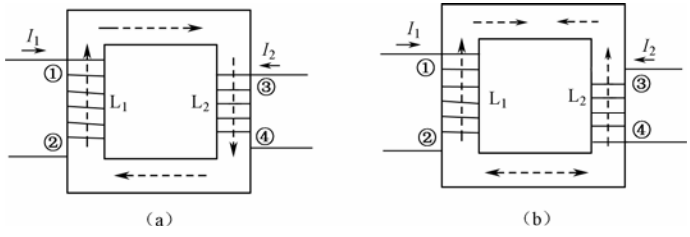


图 4-5　已知绕向的变压器极性判别

如果电流流过两个绕组，两个绕组产生的磁场方向相反，则一个绕组的电流输入端与另一

个绕组的电流输出端为同名端。如图 4-5（b）所示，绕组 L_1 产生的磁场方向为顺时针，L_2 产生的磁场为逆时针，即两绕组产生的磁场方向相反，绕组 L_1 的电流输入端①与 L_2 的电流输出端④为同名端。

（2）对于已封装好、无法知道绕向的变压器

在平时接触更多的是已封装好的变压器，对这种变压器很难知道绕组的绕向，用前面的方法无法判别出同名端，此时可使用实验的方法。该方法如下：

如图 4-6（a）所示，将变压器的一个绕组的一端与另一个绕组的一端连接起来（图中是将②、④端连接起来），再在两个绕组另一端之间连接一个电压表（图中是在①、③端之间连接电压表），然后给一个绕组加一个较低的交流电压（图中是在①、②端加 U_1 电压）。观察电压表 V 测得的电压值 U，如果电压值是两个绕组电压的和，即 $U=U_1+U_2$，则①、④端为同名端，其等效原理如图 4-6（b）所示；如果 $U=U_1-U_2$，则①、③端为同名端，其等效原理如图 4-6（c）所示。

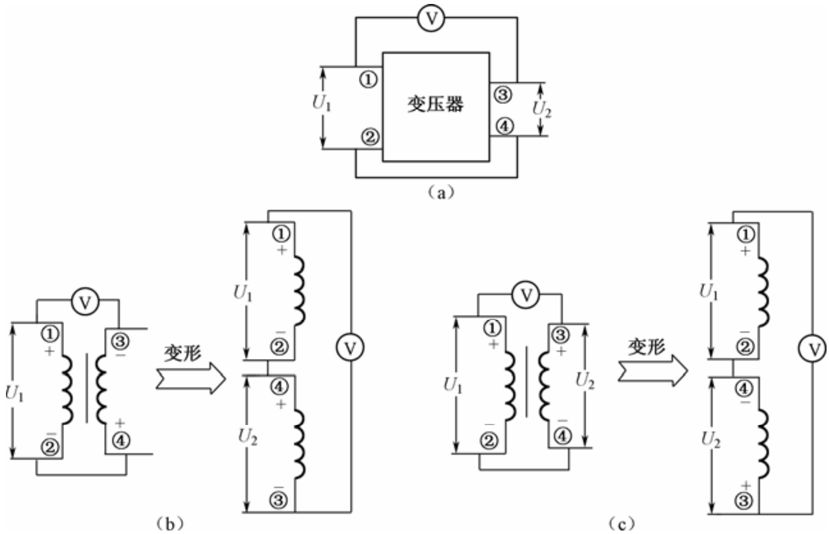


图 4-6　绕向未知的变压器极性判别

4.2　三相变压器

4.2.1　电能的传送

发电部门的发电机将其他形式的能（如水能、化学能）转换成电能，电能再通过导线传送给用户。由于用户与发电部门的距离往往很远，电能传送需要很长的导线，电能在导线传送的过程中有损耗。根据焦耳定律 $Q=I^2Rt$ 可知，损耗的大小主要与流过导线的电流和导线的电阻有关，电流、电阻越大，导线的损耗越大。

为了降低电能在导线上传送产生的损耗，可减小导线电阻和降低流过导线的电流来实现。

具体做法有：①采用电阻率小的铝或铜材料制作成粗导线来减小导线的电阻；②提高传送电压来减小电流，这是根据 $P=UI$ 确定的，当传送的功率一定时，导线电压越高，流过导线的电流越小。

电能传送示意图如图 4-7 所示。发电机输出的电压先送到升压变电站进行升压，升压后得到 110～330kV 的高压，高压经导线进行远距离传送，到达目的地后，再由经降压变压站的降压变压器将高压降低到 220V 或 380V 的低压，提供给用户。实际上，在提升电压时，往往不是依靠一个变压器将低压提升到很高的电压，而是经过多个升压变压器一级一级地进行升压，在降压时，也需要经过多个降压变压器进行逐级降压。

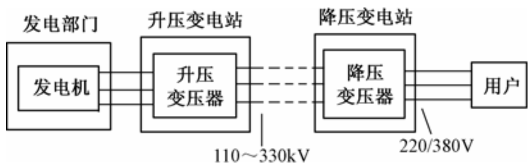


图 4-7　电能传送示意图

4.2.2　三相变压器

（1）三相交流电的产生

目前电力系统广泛采用三相交流电，**三相交流电是由三相交流发电机产生的。**三相交流发电机原理示意图如图 4-8 所示。

从图 4-8 中可以看出，三相发电机主要是由 U、V、W 三个绕组和磁铁组成，当磁铁旋转时，在 U、V、W 绕组中会分别产生电动势，各绕组两端的电压分别为 U_U、U_V、U_W，这三个绕组输出的三组交流电压就称做三相交流电压。

（2）利用单相变压器改变三相交流电压

要将三相交流发电机产生的三相电压传送出去，为了降低线路损耗，需对每相电压都进行提升。简单的做法是采用三个单相变压器，如图 4-9 所示。单相变压器是指一次绕组和二次绕组分别只有 1 组的变压器。

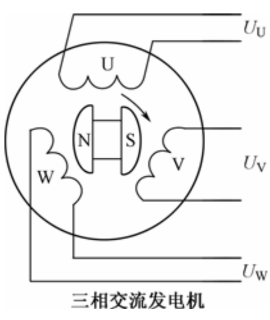


图 4-8　三相交流发电机原理示意图

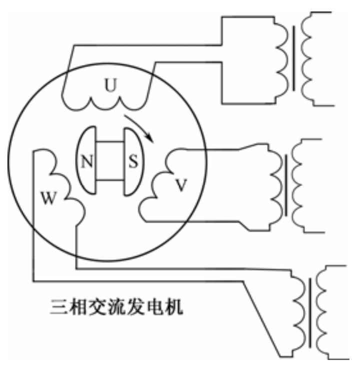


图 4-9　利用三台单相变压器改变三相交流电压

（3）利用三相变压器改变三相交流电压

将三对绕组绕在同一铁芯上可以构成三相变压器。三相交流变压器的结构如图 4-10 所示。

利用三相变压器也可以改变三相交流电压，具体接法如图 4-11 所示。

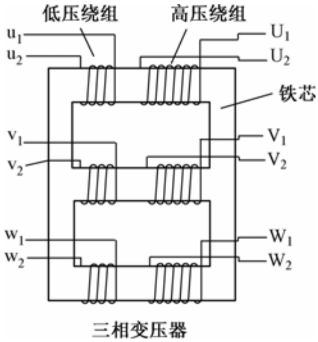


图 4-10　三相交流变压器的结构

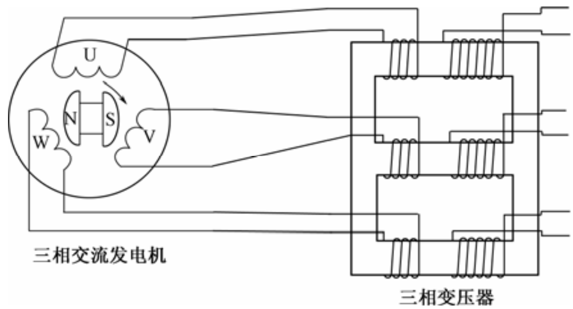
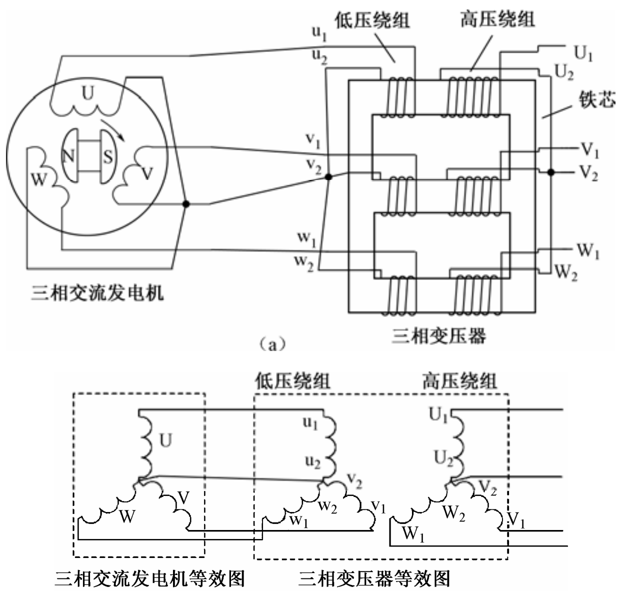


图 4-11　利用三相变压器改变三相交流电压

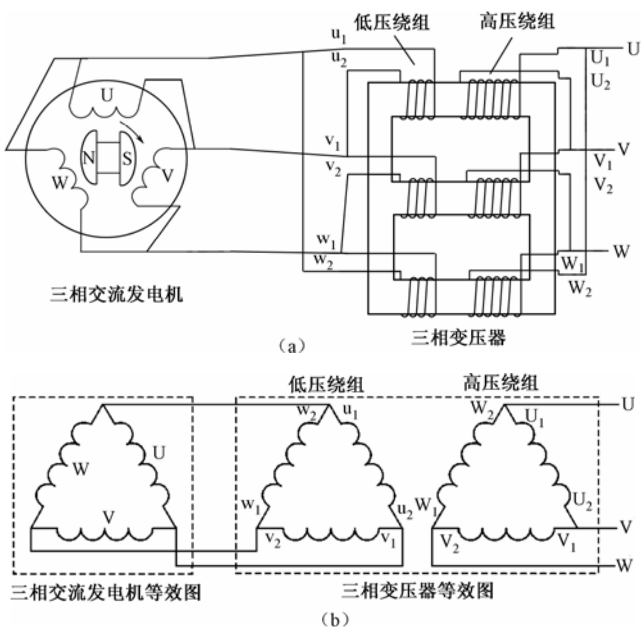
4.2.3　三相变压器的供电连接方式

采用如图 4-11 所示的方法连接的三相发电机与变压器，其缺点是连接所需的导线太多，在进行远距离电能传送时必然会使线路成本上升。为了解决这个问题，三相变压器的供电连接可采用星形连接和三角形连接。三相变压器的供电连接方式说明见表 4-2。

表 4-2　三相变压器的供电连接方式说明

连接方法	说　　明
星形连接	发电机绕组与变压器绕组的星形接法方式如图 1 所示，采用星形接法可以减少导线数量，从而降低成本。  图 1 发电机绕组与变压器绕组的星形连接方式

续表

连接方法	说　　明
	星形接法的具体做法是：将发电机的三相绕组的末端连起来构成一个连接点，该连接点称为中性点；将变压器三个低压绕组（匝数少的线圈）的末端连接起来构成中性点；将变压器三个高压绕组的末端连接起来构成中性点。然后按图 1（a）所示的方法，将发电机三相绕组的首端分别与变压器三个低压绕组的首端连接起来。 发电机绕组与变压器绕组连接方式可以画成如图 1（b）所示的形式，从图中可以看出，**发电机绕组和变压器绕组连接呈星形，故这种接法称为星形接法**，因为这种接法需用到 4 根导线，故又称三相四线制星形接法。 发电机和变压器之间按星形连接好后，变压器就可以升高发电机送来的三相电压。如发电机的 U 相电压送到变压器的绕组 u_1u_2 两端，在高压绕组 U_1U_2 两端就会输出升高的 U 相电压。
三角连接	三相变压器与三相发电机之间的连线除了有星形接法外，还有三角形接法。三相变压器与三相发电机之间的三角形接法方式如图 2 所示。  图 2　发电机绕组与变压器绕组的三角形连接方式 三角形接法的具体做法是：将发电机的三相绕组的首尾依次连接起来，再在每相绕组首端连出引线，如图 2（a）所示；将变压器的低压绕组的首尾依次连接起来，并在每绕组首端连出引线；将变压器的高压绕组的首尾依次连接起来，并在每绕组首端连出引线；最后按照图 2（a）所示方法将发电机的三根引线与变压器低压绕组相对应的三根引线连接起来。 发电机绕组与变压器绕组连接方式可以画成如图 2（b）所示的形式，从图中可以看出，**发电机绕组和变压器绕组连接呈三角形，故这种接法称为三角形接法**，这种接法需用到 3 根导线，故又称三相三线制三角形接法。

4.3 电力变压器

电力变压器的功能是对传送的电能进行电压或电流的变换。大多数电力变压器属于三相变压器。电力变压器有升压变压器和降压变压器之分，升压变压器用于将发电机输出的低压升高，再通过电网线输送到各地，降压变压器用于将电网高压降低成低压，送给用户使用。平时见到的电力变压器大多数是降压变压器。

4.3.1　外形与结构

电力变压器的实物外形如图 4-12 所示。

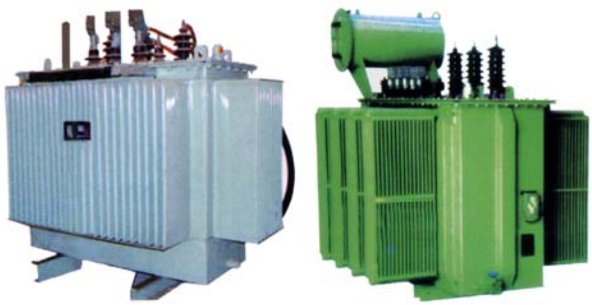


图 4-12　电力变压器的实物外形

由于电力变压器所接的电压高、传输的电能大，为了铁芯和绕组的散热和绝缘，一般将它们放置在装有变压器油的绝缘油箱内（变压器油具有良好的绝缘性），高低压绕组引出线均通过绝缘性能好的瓷套管引出，另外变压器还有各种散热保护装置。电力变压器的结构如图 4-13 所示。

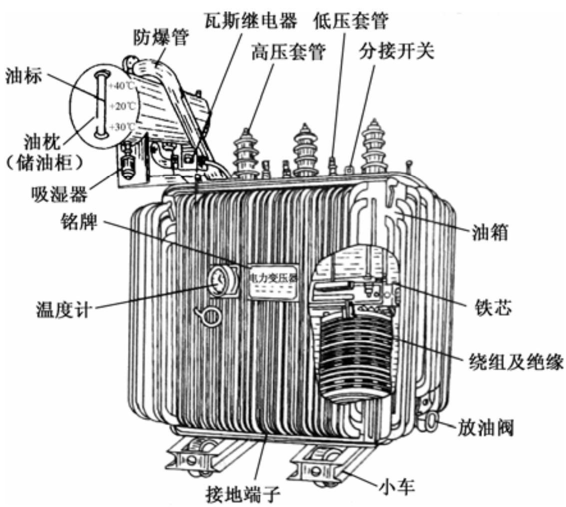
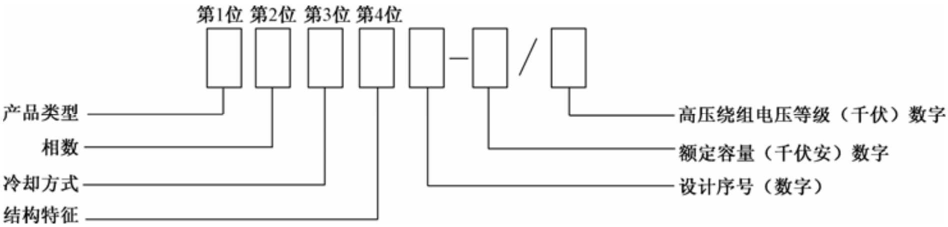


图 4-13　电力变压器的结构

4.3.2 型号说明

电力变压器的型号表示方式说明如下。



电力变压器型号中的字母含义见表 4-3。

表 4-3 电力变压器型号中字母的含义

位次	内容	代号	含　义	位次	内容	代号	含　义
第一位	类别	O	自耦变压器（O 在前为降压，O 在后为升压）	第三位	冷却	G	干式
		（略）	电力变压器			（略）	油浸自冷
		H	电弧炉变压器			F	油浸风冷
		ZU	电阻炉变压器			S	水冷
		R	加热炉变压器			FP	强迫油循环风冷
		Z	整流变压器			SP	强迫油循环水冷
		K	矿用变压器			P	强迫油循环
		D	低压大电流用变压器	第四位和第五位	结构	（略）	双线圈
		J	电机车用变压器（机床、局部照明用）			S	三线圈
		Y	试验用变压器			（略）	铜线
		T	调压器			L	铝线
		TN	电压调整器			C	接触调压
		TX	移相器			A	感应调压
		BX	焊接变压器			Y	移圈式调压
		ZH	电解电化学变压器			Z	有载调压
		G	感应电炉电压器			（略）	无激磁调压
		BH	封闭电弧炉变压器			K	带电抗器
第二位	相数	D	单相			T	成套变电站用
		S	三相			Q	加强型

例如：一台电力变压器的型号为 S9-500／10，该型号说明该变压器是一台三相油浸自冷式铜线双绕组电力变压器，其额定容量为 5×10^5 千伏安，高压侧额定电压为 10^4V，设计序号为 9。注：此型号中第 1、3、4 位均略。

4.3.3　连接方式

在使用电力变压器时，其高压侧绕组需要与高压电网连接，低压侧绕组则与低压电网连接，这样才能将高压降低成低压供给用户。电力变压器与高、低压电网的连接方式有许多种，图 4-14 就是两种较常见的连接方式。

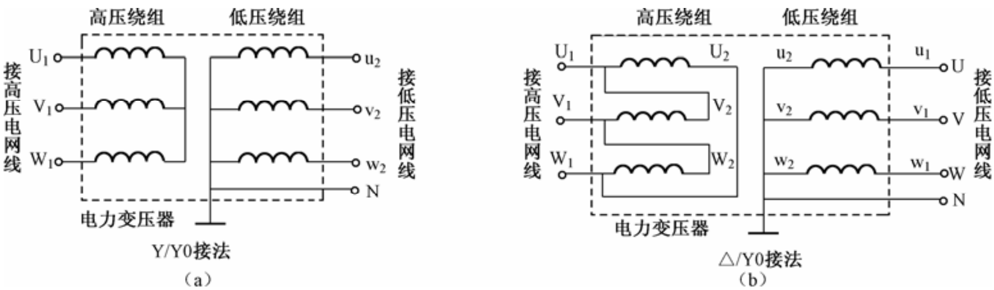


图 4-14　电力变压器与高、低压电网的两种连接方式

在图 4-14 中，电力变压器的高压绕组首端和末端分别用 U_1、V_1、W_1 和 U_2、V_2、W_2 表示，低压绕组的首端和末端分别用 u_1、v_1、w_1 和 u_2、v_2、w_2 表示。图（a）中的变压器采用了 Y / Y0 接法，即**高压绕组采用中性点不接地的星形接法（Y），低压绕组采用中性点接地的星形接法（Y0），这种接法又称为 Yyn0 接法**。图（b）中的变压器采用了△ / Y0 接法，即**高压绕组采用三角形接法，低压绕组采用中性点接地的星形接法，这种接法又称为 Dyn11 接法**。

在工作时，电力变压器每个绕组上都有电压，每个绕组上的电压称为相电压，高压绕组中的每个绕组上的相电压都相等，低压绕组中每个绕组上的相电压也都相等。如果图 4-14 中的电力变压器低压绕组是接照明用户，低压绕组的相电压通常为 220V，由于低压侧三个绕组的三端连接在一个公共点上并接出导线（称为中性线），所以每根相线（即每个绕组的引出线）与中性线之间的电压（称为相电压）为 220V，而两根相线之间有两个绕组，故两根相线之间的电压（称为线电压）应大于相电压，线电压为 $220\sqrt{3}$ =380V。

这里要说明一点，线电压虽然是两个绕组上的相电压叠加得到的，但由于两个绕组上的电压相位不同，故线电压与相电压的关系不是乘 2，而是乘 $\sqrt{3}$ 。

4.4　自耦变压器

普通的变压器有一次绕组和二次绕组，如果**将两个绕组融合成一个绕组就能构成一种特殊的变压器——自耦变压器。自耦变压器是一种只有一个绕组的变压器。**

4.4.1　结构与原理

自耦变压器结构和符号如图 4-15 所示。

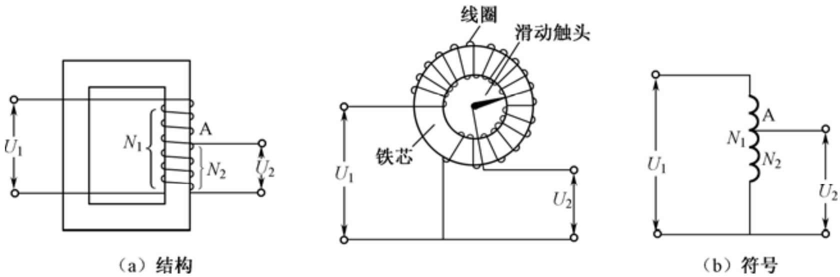


图 4-15　自耦变压器的结构和符号

从图 4-15 中可以看出，自耦变压器只有一个绕组（匝数为 N_1），在绕组的中间部分（图中为 A 点）引出一个接线端，这样就将绕组的一部分当做二次绕组（匝数为 N_2）。

自耦变压器工作原理与普通的变压器相同，也可以改变电压的大小，其规律同样可以用下式表示：

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{N_1}{N_2}=K$$

从式子可以看出，改变 N_2 就可以调节输出电压 U_2 的大小。为了方便改变输出电压，自耦变压器将绕组的中心抽头换成一个可滑动的触头，如图 4-15（a）所示。当旋转触头时，线圈匝数 N_2 就会变化，输出电压也就变化，从而实现手动调节输出电压的目的，这种自耦变压器又称做自耦调压器。

4.4.2　实物外形

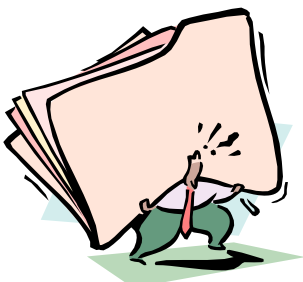
自耦变压器种类很多，图 4-16 就列出了一些自耦变压器。



图 4-16　一些常见的自耦变压器

第 5 章

低 压 电 器



问：老师，什么是低压电器？



答：低压电器通常是指在交流电压 1200V 或直流电压 1500V 条件下使用的电气器件。

常用的低压电器有开关、熔断器、接触器和继电器等，当进行电气线路安装时，在电源和负载（如电动机）之间用低压电器连接起来，可以实现接通、切断、保护等控制功能。

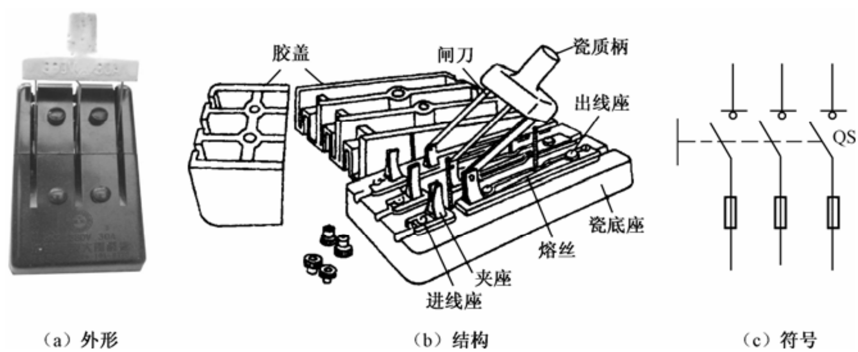
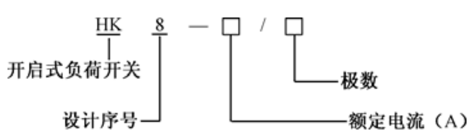
5.1 开　　关

开关是电气线路中使用最广泛的一种低压电器，它的作用是接通、切断电气线路或者用来发出控制命令。开关的种类很多，用来控制电气主电路通断的开关有开启式负荷开关、封闭式负荷开关、组合开关等，用来接通和断开控制电路的开关有按钮开关、行程开关、接近开关和万能转换开关等。

5.1.1　开启式负荷开关

开启式负荷开关俗称闸刀开关，又称瓷底胶盖刀开关，它可分为两极闸刀开关和三极闸刀开关。开启式负荷开关说明见表 5-1。

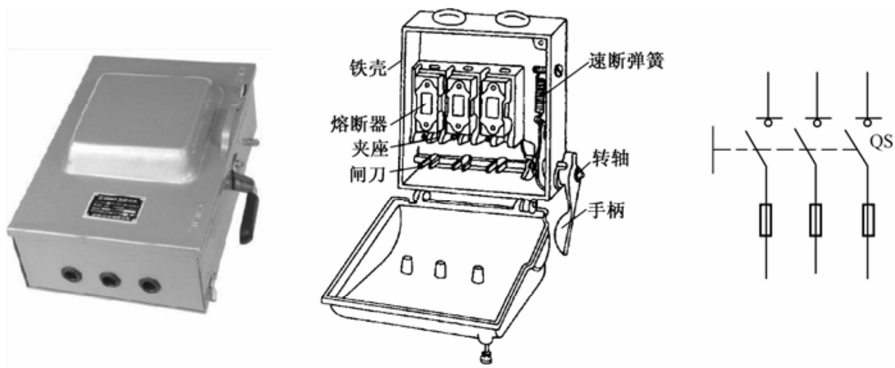
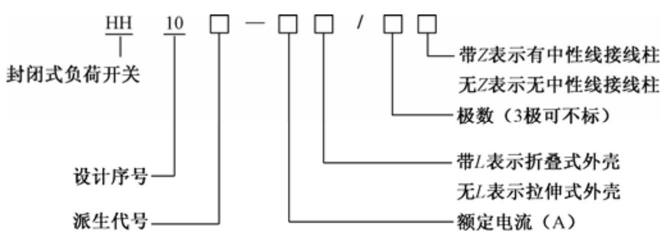
表 5-1　开启式负荷开关说明

关键点	说　　明
外形、结构与符号	开启式负荷开关的外形、结构与符号如图 1 所示。**开启式负荷开关除了能接通、切断电源外，由于内部接有熔丝，所以还能起过流保护作用。**  图 1　开启式负荷开关
选用要求	开启式负荷开关需要手柄向上垂直安装，进线接上端，出线接下端，进出线不能接反，以免触电，由于开启式负荷开关没有灭电弧装置（闸刀接通或断开时产生的电火花称为电弧），所以不能用做大容量负载的通断控制。 **开启式负荷开关一般用在照明、电热设备线路中，也可以用在非频繁启动/停止的小容量电动机（5kW 以下）控制线路中。当用在电动机控制线路中时，其额定电流应大于所有负载电流之和的 3 倍。**
型号含义	

5.1.2　封闭式负荷开关

封闭式负荷开关又称铁壳开关，封闭式负荷开关是在开启式负荷开关的基础上进行改进而设计出来的。封闭式负荷开关说明见表 5-2。

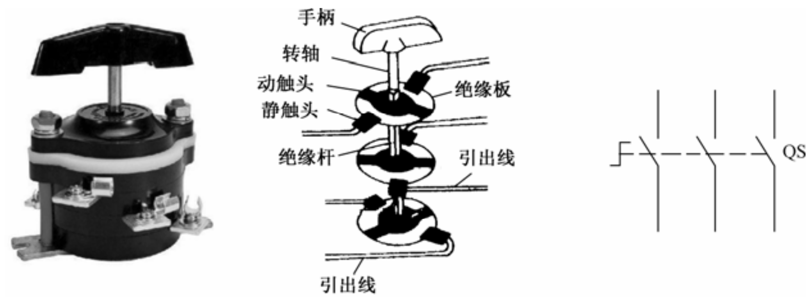
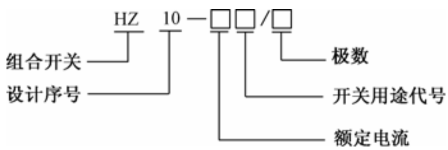
表 5-2　封闭式负荷开关说明

关键点	说　明
外形、结构与符号	铁壳开关的外形、结构与符号如图 1 所示。  （a）外形　（b）结构　（c）符号 图 1　封闭式负荷开关
特点	铁壳开关的主要优点有： ①在封闭式负荷开关内部有一个速断弹簧，在操作手柄打开或关闭开关外盖时，依靠弹簧的作用力，可以使开关内部的闸刀迅速断开或合上，这样能有效地减少电弧。 **②封闭式负荷开关内部具有连锁机构，当外盖打开时手柄无法合闸，当手柄合闸后，外盖无法打开，这样保证了操作安全。**
选用要求	封闭式负荷开关常用在农村和工矿的电力照明、电力排灌等配电设备中，封闭式负荷开关可用在 15kW 以下非频繁启动/停止的电动机控制线路中，其额定电流应大于电动机额定电流的 1.5 倍。
型号含义	

5.1.3　组合开关

组合开关又称转换开关，它是一种由多层触点组成的开关。组合开关说明见表 5-3。

表 5-3　组合开关说明

关键点	说　　明
外形、结构与符号	组合开关的外形、结构与符号如图 1 所示。图中的组合开关由三层动、静触点组成，当旋转手柄时，可以同时调节三组动触点与三组静触点之间的通断，为了有效地灭弧，在转轴上装有弹簧，在操作手柄时，依靠弹簧的作用可以迅速接通或断开触点。  （a）外形　（b）结构　（c）符号 图 1　组合开关
选用要求	组合开关常用于交流 380V 以下或直流 220V 以下的电气线路中，它不宜进行频繁的转换操作，可用来控制 5kW 以下的小功率电动机。组合开关用于直接控制电动机启动、停止和正反转时，其额定电流一般取电动机额定电流的 1.5～2.5 倍。
型号含义	

5.1.4　倒顺开关

倒顺开关又称可逆转开关，专用来控制小功率三相异步电动机正转和反转。倒顺开关的外形与符号如图 5-1 所示。



（a）外形　　（b）符号

图 5-1　倒顺开关

倒顺开关有“倒”、“停”、“顺”三个位置，当开关处于“停”位置时，动触点与静触点均

处于断开状态，如图 5-1（b）所示，当开关由“停”旋转至“顺”位置时，动触点 U、V、W 分别与静触点 L_1、L_2、L_3 接触，当开关由“停”旋转至“倒”位置时，动触点 U、V、W 分别与静触点 L_3、L_2、L_1 接触。

5.1.5　按钮开关

按钮开关用来在短时间内接通或断开小电流电路，主要用在电气线路的控制电路中。按钮开关允许流过的电流较小，一般不能超过 5A。按钮开关说明见表 5-4。

表 5-4　按钮开关说明

<table>
<tr><th>关键点</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td>结构与符号</td><td>

按钮开关分为三种类型：常闭按钮开关、常开按钮开关和复合开关。这三种开关的内部结构和电路符号如图 1 所示。

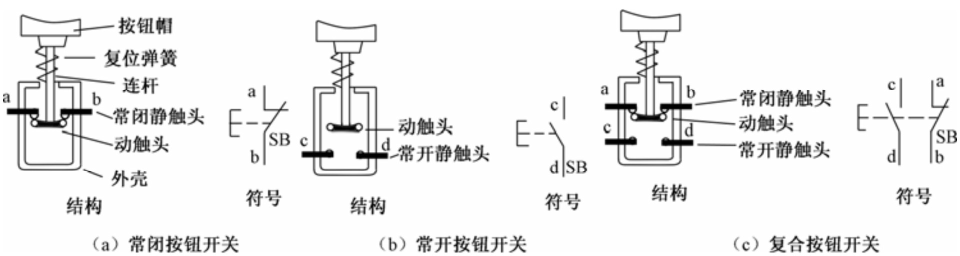


图 1　三种按钮开关的结构与符号

图 1（a）为常闭按钮开关，在未按下按钮时，依靠复位弹簧的作用力使内部的金属动触点将常闭静触点 a、b 接通，当按下按钮时，动触点与常闭静触点脱离，a、b 断开。

图 1（b）为常开按钮开关，在未按下按钮时，金属动触点与常开静触点 a、b 断开，当按下按钮时，动触点与常闭静触点接通。

图 1（c）为复合按钮开关，在未按下按钮时，金属动触点与常闭静触点 a、b 接通，而与常开静触点断开，当按下按钮时，动触点与常闭静触点断开，而与常开静触点接通。

有些按钮开关内部有多对常开、常闭触点，它可以在接通多个电路的同时切断多个电路。

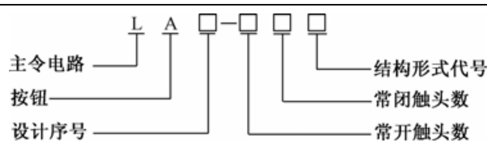
</td></tr>
<tr><td>外形</td><td>

常见的按钮开关实物外形如图 2 所示。



图 2　常见的按钮开关实物外形

</td></tr>
<tr><td>型号含义</td><td>

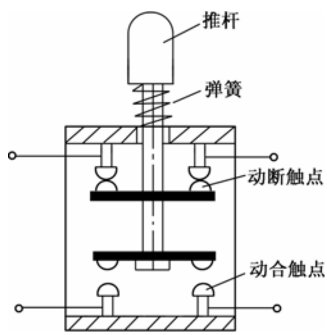
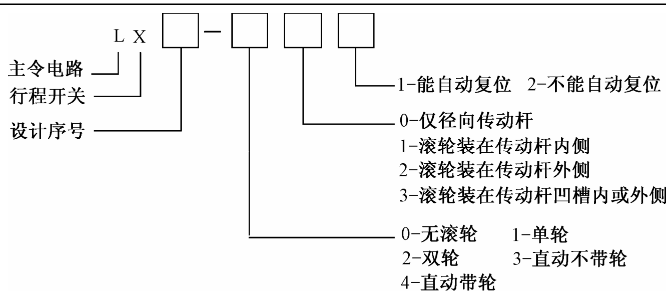


</td></tr>
</table>

5.1.6 行程开关

行程开关是一种利用机械运动部件的碰压使触点接通或断开的开关。行程开关说明见表 5-5。

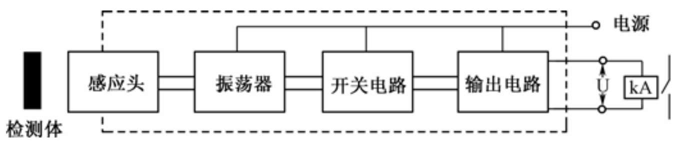
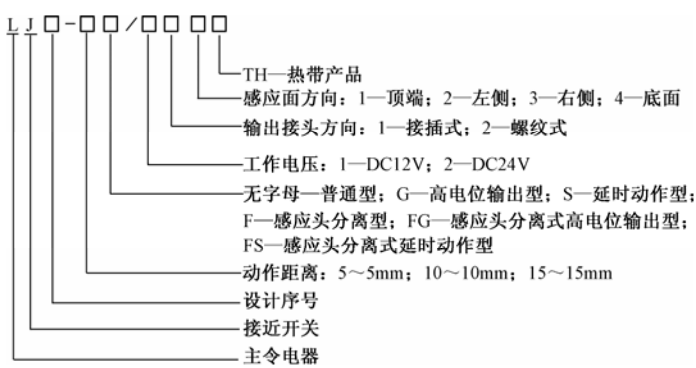
表 5-5 行程开关说明

关键点	说 明
外形、符号与结构	行程开关的外形与符号如图 1 所示。  图 1 行程开关的外形与符号 **行程开关的种类很多，根据结构可分为直动式（或称按钮式）、旋转式、微动式和组合式等。**图 2 是直动式行程开关的结构示意图。从图中可以看出，行程开关的结构与按钮开关基本相同，只是将按钮改成推杆。在使用时将行程开关安装在机械部件运动路径上，当机械部件运动到行程开关位置时，会撞击推杆而让动断触点（即常闭触点）断开、动合触点（即常开触点）接通。  图 2 直动式行程开关的结构示意图
型号含义	

5.1.7　接近开关

接近开关又称无触点位置开关，当运动的物体靠近接近开关时，能感知物体的存在而发出控制信号。接近开关除了可以用在运动机械设备中进行行程控制和限位保护外，还可以用做高速计数、测速、检测物体大小等。接近开关说明见表 5-6。

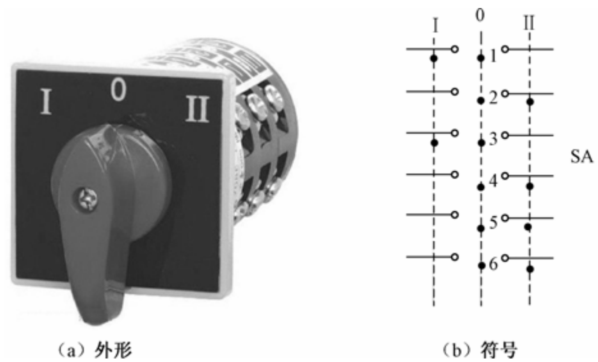
表 5-6　接近开关说明

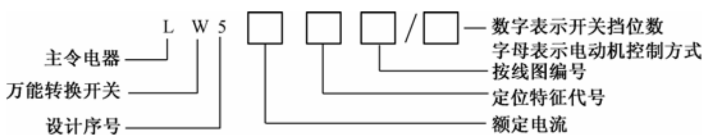
关键点	说　　明
外形与符号	接近开关的外形和符号如图 1 所示。  图 1　接近开关
工作原理	接近开关种类很多，常见的有高频振荡型、电容型、光电型、霍尔型、电磁感应型和超声波型等，其中高频振荡型接近开关最为常见。高频振荡型接近开关的组成如图 2 所示。  图 2　高频振荡型接近开关的组成 当金属检测体接近感应头时，作为振荡器一部分的感应头损耗增大，迫使振荡器停止工作，后面的开关电路因振荡器停振而产生一个控制信号传送给输出电路，让输出电路输出控制电压，若该电压输送给继电器，就会让继电器产生吸合动作来接通或断开电路。
型号含义	

5.1.8 万能转换开关

万能转换开关由多层触点中间叠装绝缘层构成，它主要用来转换控制线路，也可用做小功率电动机的启动、换向和变速等。万能转换开关说明见表 5-7。

表 5-7 万能转换开关说明

<table>
<tr><th>关键点</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td>外形与符号</td><td>万能转换开关的外形、符号和触点分合表如图 1 所示。


（a）外形　（b）符号
<table>
<tr><th>触点号</th><th>I</th><th>0</th><th>II</th></tr>
<tr><td>1</td><td>×</td><td>×</td><td></td></tr>
<tr><td>2</td><td></td><td>×</td><td>×</td></tr>
<tr><td>3</td><td>×</td><td>×</td><td></td></tr>
<tr><td>4</td><td></td><td>×</td><td>×</td></tr>
<tr><td>5</td><td></td><td>×</td><td>×</td></tr>
<tr><td>6</td><td></td><td>×</td><td>×</td></tr>
</table>
（c）触点分合表
图 1 万能转换开关
图中的万能转换开关有 6 路触点，它们的通断受手柄的控制，手柄有Ⅰ、0、Ⅱ三个挡位，手柄处于不同挡位时，6 路触点通断情况不同，从图 1（b）所示的万能转换开关符号可以看出不同挡位触点通断情况。
在万能转换开关符号中，“—o o—”表示一路触点，竖虚线表示手柄位置，触点下方虚线上的黑圆点“•”表示手柄处于虚线所示的挡位时该路触点接通。例如手柄处于“0”挡位时，6 路触点在该挡位虚线上都标有黑圆点“•”，表示在“0”挡位时 6 路触点都是接通的；手柄处于“Ⅰ”挡时，1、3 路触点相通；手柄处于“Ⅱ”挡时，2、4、5、6 路触点是相通的。万能转换开关触点在不同挡位的通断情况也可以用图 1（c）所示的触点分合表说明，“×”表示相通。</td></tr>
<tr><td>型号含义</td><td>
</td></tr>
</table>

5.1.9 开关的检测

开关种类虽然很多，但检测方法基本相同，这里以检测复合型按钮开关为例来说明开关的检测方法。

按钮开关检测一般采用万用表的 R×1Ω或 R×10Ω挡，具体测量时通常分两个过程。

① 在未按下按钮时进行检测

图 5-2 中所示的开关是一个复合型按钮开关，它包括一个常闭触点和一个常开触点，在检

测时，先测量常闭触点的两个接线端之间的阻值，如图 5-2（a）所示，然后测量常开触点的两个接线端之间的阻值，如图 5-2（b）所示。如果按钮开关正常，常闭触点阻值应为 0，常开触点阻值应为无穷大，若与之不符，则按钮开关损坏。

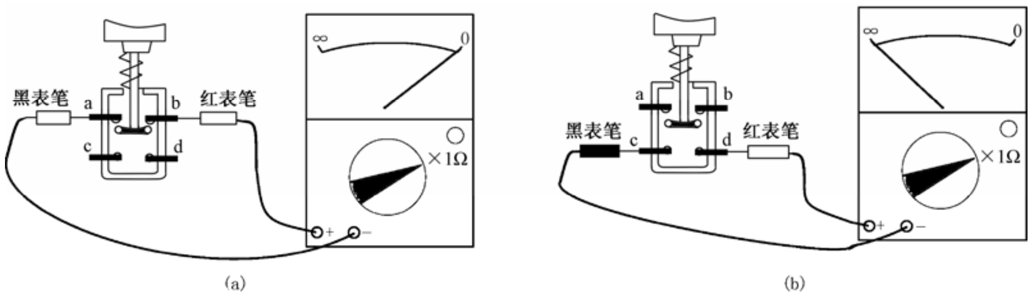


图 5-2　按钮开关的检测

② 在按下按钮时进行检测

在检测时，先按下开关的按钮，在保持开关处于按下状态时，分别测量常闭触点和常开触点两个接线端之间的阻值，如果按钮开关正常，常闭触点阻值应为无穷大，常开触点阻值应为 0，若与之不符，则按钮开关已经损坏。

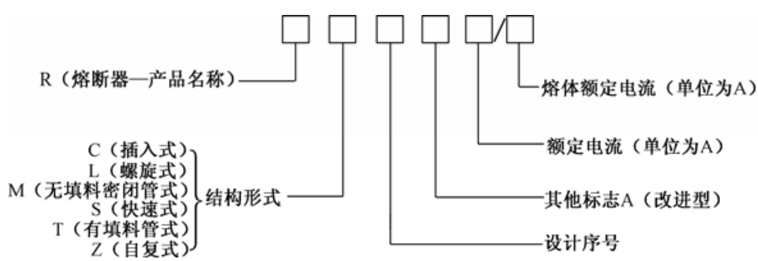
在测量常闭或常开触点时，如果出现阻值不稳定，通常是相应的开关触点接触不良。因为开关的内部结构比较简单，如果检测时发现开关不正常，可将开关拆开进行检查，找出具体的故障原因，并进行排除，无法排除的就需要更换新的开关。

5.2 熔　断　器

熔断器是一种在电路、用电设备发生短路和过载时进行保护的电器。熔断器一般串接在电路中，当电路正常工作时，熔断器就相当于一根导线，当电路出现短路或过载时，流过熔断器的电流很大，熔断器就会开路，从而保护电路和用电设备。

5.2.1　型号含义

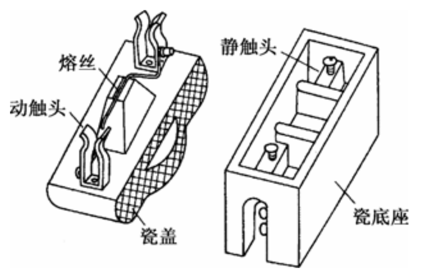
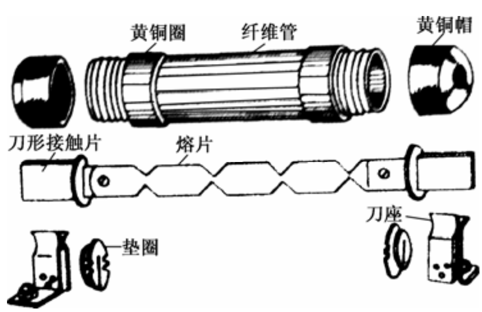
熔断器的型号含义说明如下所示。



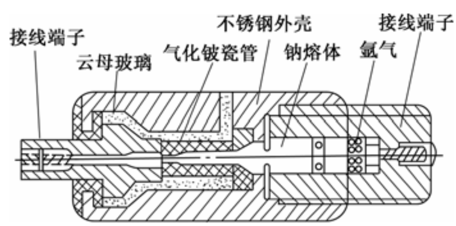
5.2.2　种类及特点

熔断器种类很多，常见的有 RC 插入式熔断器、RL 螺旋式熔断器、RM 无填料封闭式熔断器、RS 有填料快速熔断器、RT 有填料管式熔断器和 RZ 自复式熔断器等。常见熔断器种类与说明见表 5-8。

表 5-8　常见熔断器的种类与说明

类型	说　　明	示　　图
RC 插入式熔断器	RC 插入式熔断器主要用于电压在 380V 及以下、电流在 5～200A 的电路中，如照明电路和小功率电动机电路中。图 1 就是一种常见的 RC 插入式熔断器。 这种熔断器用于额定电流在 30A 以下的电路时，熔丝一般采用铅锡丝；当用在电流为 30～100A 的电路时，熔丝一般采用铜丝；当用在电流达 100A 以上的电路时，一般用变截面的铜片作为熔丝。	 图 1　一种常见的 RC 插入式熔断器
RL 螺旋式熔断器	图 2 是一种常见的 RL 螺旋式熔断器，这种熔断器在使用时，要在内部安装熔管，在安装熔管时，先将熔断器的瓷帽旋下，再将熔管放入内部，然后旋好瓷帽。 熔管上下方为金属盖，有的熔管上方的金属盖中央有一个红色的熔断指示器，熔管内部装有石英砂和熔丝，当熔丝熔断时，指示器颜色会发生变化，以指示内部熔丝已断。指示器的颜色变化可以通过熔断器的瓷帽上的玻璃窗口观察到。 RL 螺旋式熔断器具有体积小，分断能力较大、工作安全可靠，安装方便等优点，通常用在工厂 200A 以下的配电箱、控制箱和机床电机的控制电路中。	 图 2　一种常见的 RL 螺旋式熔断器
RM 无填料封闭式熔断器	图 3 是一种典型的 RM 无填料封闭式熔断器，它可以拆卸。这种熔断器的熔体是一种变截面的锌片，它被安装在纤维管中，锌片两端的接触片穿过黄铜帽，再通过垫圈安插在刀座中。 当这种熔断器通过大电流时，锌片中较窄的部分首先熔断，使中间大段的锌片脱断，形成很大的间隔，有利于灭弧。 RM 无填料封闭式熔断器具有保护性好、分断能力强、熔体更换方便和安全可靠等优点，主要用在交流电压 380V 以下、直流 440V 以下，电流 600A 以下的电力电路中。	 图 3　一种典型 RM 无填料封闭式熔断器

续表

类型	说　　明	示　　图
RS 有填料快速熔断器	RS 有填料快速熔断器主要用于硅整流元件、晶闸管元件等半导体器件及其配套设备的短路和过载保护，它的熔体一般采用银制成，具有熔断迅速、能灭弧等优点。图 4 是几种常见的 RS 有填料快速熔断器。	 图 4　几种常见的 RS 有填料快速熔断器
RT 有填料封闭管式熔断器	RT 有填料封闭管式熔断器又称石英熔断器，它常用做变压器和电动机等电气设备的过载和短路保护。图 5 是几种常见的 RT 有填料封闭管式熔断器，这些熔断器可以用螺钉、卡座等与电路连接起来，右图最右端为一种熔断器插在卡座内。 RT 有填料封闭管式熔断器具有保护性好、分断能力强、灭弧性能好和使用安全等优点，主要用在短路电流大的电力电网和配电设备中。	 图 5　几种常见的 RT 有填料封闭管式熔断器
RZ 自复式熔断器	RZ 自复式熔断器结构示意图如图 6 所示，它的内部采用金属钠作为熔体，在常温下，钠的电阻很小，整个熔断丝的电阻也很小，可以通过正常的电流。若电路出现短路会导致流过钠熔体的电流很大，钠被加热气化，电阻变大，熔断器相当于开路，当短路消除后，流过的电流减小，钠又恢复成固态，电阻又变小，熔断器自动恢复正常。 自复式熔断器通常与低压断路器配套使用，其中自复式熔断器用于短路保护，断路器用于控制和过载保护，这样可以提高供电可靠性。	 图 6　RZ 自复式熔断器结构示意图

5.2.3　熔断器的检测

熔断器常见故障是开路、接触不良。熔断器种类很多，但检测方法基本相同，检测时通常使用万用表的 R×1Ω或 R×10Ω挡。熔断器的检测如图 5-3 所示。

检测时，将万用表置于 R×1Ω或 R×10Ω挡，然后红、黑表笔分别接熔断器的两端，测量熔断器的阻值。若熔断器正常，则阻值为 0；若阻值无穷大，则熔断器开路；若阻值不稳定（时大时小），则熔断器内部接触不良。

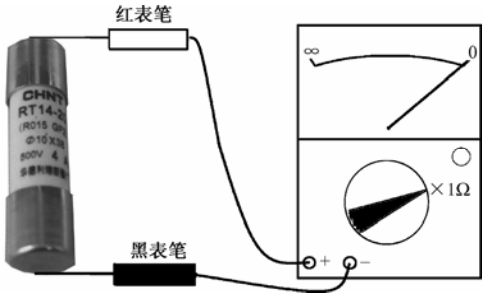


图 5-3　熔断器的检测方法

5.3　断　路　器

断路器又称做自动空气开关，它能对电路进行通断控制，又能在电路出现过载、短路和欠压（电压过低）时自动跳闸（即自动切断电路），因此它既是一个开关电器，又是一个保护电器。

5.3.1　结构与原理

断路器的组成结构如图 5-4 所示。从图中可以看出，断路器内部主要由三个主触点、反力弹簧、搭钩、杠杆、电磁脱扣器、热脱扣器、欠电压脱扣器和分励脱扣器等组成。该断路器可以实现过流、过热、欠压保护和远距控制跳闸等功能。

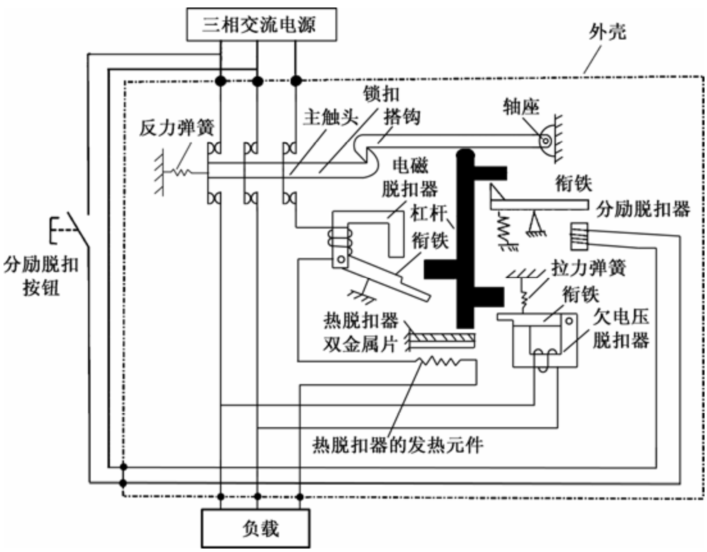


图 5-4　断路器的典型结构

1．过流保护原理

三相交流电源经断路器的三个主触点和三条线路为负载提供三相交流电，其中一条线路中

串接了电磁脱扣器线圈和发热元件。

当负载有严重短路时，流过线路的电流很大，流过电磁脱扣器线圈的电流也很大，线圈产生很强的磁场通过铁芯吸引衔铁，衔铁动作，带动杠杆上移，两个搭钩脱离，依靠反力弹簧的作用，三个主触点动、静触点断开，从而切断了电源，保护了短路的负载。

2．过热保护

如果负载没有短路，但若长时间超负荷运行，负载也比较容易损坏。虽然这种情况下电流也比正常时大，但还不足以使电磁脱扣器动作，断路器的热保护装置可以解决这个问题。

若负载长时间超负荷运行，流过发热元件的电流长时间偏大，发热元件温度升高，它加热旁边的双金属片（热脱扣器），双金属片上面的金属片热膨胀小，双金属片受热后向上弯曲，推动杠杆上移，两个搭钩脱离，三个主触点动、静触点断开，从而切断了电源。

3．欠压保护

如果电源电压过低，断路器也能切断电源与负载的连接，执行保护功能。断路器的欠压脱扣器线圈串接在两条电源线之间，当三相交流电源的电压很低时，两条电源线之间的电压也很低，流过欠电压脱扣器线圈的电流小，线圈产生的磁场弱，不足以吸引住衔铁，在拉力弹簧的拉力作用下，衔铁上移，推动杠杆上移，两个搭钩脱离，三个主触点和动、静触点断开，就断开了电源与负载的连接。

4．远距离跳闸控制

远距离跳闸控制主要依靠分励脱扣器来完成。当按下分励脱扣按钮（可以安装在远离断路器的位置）时，两条电源线的电压加到分励线圈两端，线圈有电流流过而产生磁场，吸引衔铁，使之动作推动杠杆上移，让两个搭钩脱离，断路器跳闸（即三个主触点动、静触点断开），就切断了电源与负载的连接。

5.3.2　种类

断路器种类很多，根据结构形式来分，断路器主要有塑料外壳式和框架式。断路器说明见表 5-9。

表 5-9　断路器说明

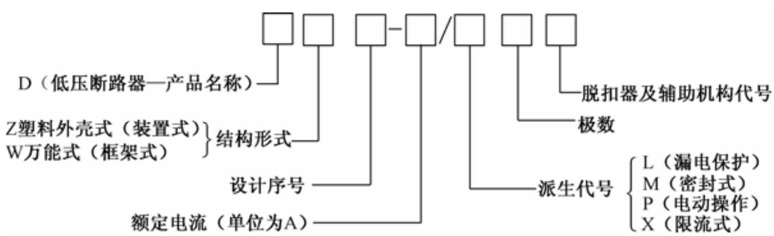
类　型	说　　明
塑料外壳式断路器	**塑料外壳式断路器又称装置式断路器，**它采用封闭式结构，除按钮或手柄外，其余的部件均安装在塑料外壳内。塑料外壳式断路器外形如图 1 所示，这种断路器的电流容量较小，分断能力低，但分断速度快。它主要用在照明配电和电动机控制电路中，起保护作用。 常见的塑料外壳式断路器型号有 DZ5 系列和 DZ10 系列，其中 DZ5 系列为小电流断路器，额定电流范围一般为 10～50A；DZ10 系列为大电流断路器，额定电流等级有 100A、250A 和 600A 三种。

续表

类　型	说　　明
	 图 1　塑料外壳式断路器
框架式断路器	**框架式断路器又称万能式熔断器**，它一般都有一个钢制的框架，所有的部件都安装在这个框架内。框架式断路器外形如图 2 所示，这种断路器电流容量大，分断能力强，热稳定性好。它主要用在 380V 的低压配电系统中作过流、欠压和过热保护。 常见的框架式断路器有 DW10 系列和 DW15 系列，其额定电流等级有 200A、400A、600A、1000A、1500A、2500A 和 4000A 七挡。  图 2　框架式（万能式）熔断器 此外，还有一种限流式断路器，当电路出现短路故障时，能在短路电流还未达到预期的电流峰值前，迅速将电路断开。这种断路器由于具有分断速度快的特点，所以常用在分断能力要求高的场合，常见的限流式断路器有 DWX 系列和 DZX 系列等。

5.3.3　型号含义

断路器的型号含义说明如下：



5.3.4　断路器的检测

断路器检测通常使用万用表的×1Ω挡或×10Ω挡，检测过程如图 5-5 所示，具体分两步。

第一步：按下断路器上的开关，使之处于“ON”（接通状态），然后将红、黑表笔分别接断路器对应的两个接线端，正常阻值应为 0Ω，然后再用同样的方法测量其他对应的接线端，正常阻值应为 0，或者阻值很小。如果阻值无穷大或阻值时大时小，则为断路器开路或接触不良。

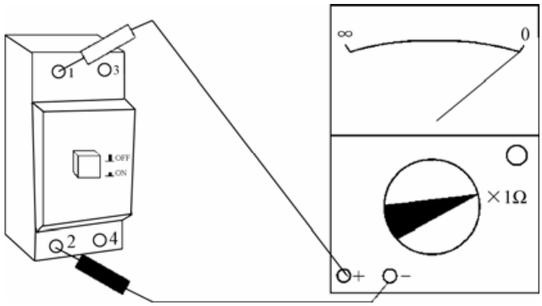


图 5-5　断路器的检测

第二步：按下断路器上的开关，使之处于“OFF”（断开状态），然后将红、黑表笔测量断路器每组对应的两个接线端，正常阻值应为无穷大。如果阻值为 0 或阻值时大时小，则断路器短路或接触不良。

5.3.5　漏电保护器

在安装配电线路选择低压电器时，除了要考虑负载出现故障时能执行保护外，还要考虑人体触电和线路漏电时能执行保护。普通的断路器可以在负载出现故障时进行保护，但在人体触电时却无能为力，这是因为人体触电安全电流很小（30mA 以下为安全电流），不足以使普通的断路器跳闸保护。在配电线路中安装漏电保护器就可以在人体触电或线路漏电时进行保护。

1．工作原理

漏电保护器又称为漏电保护开关，它的结构与工作原理如图 5-6 所示。

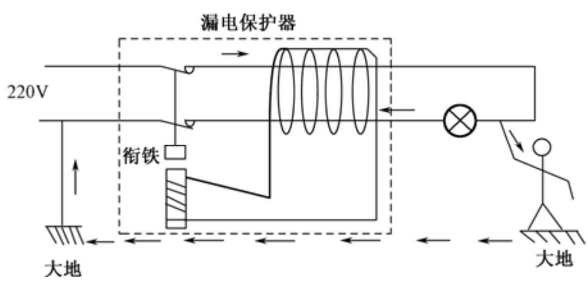


图 5-6　漏电保护器的结构与原理

图中虚线框内部分为漏电保护器结构示意图。从图中可以看出，220V 的交流电压经保护器内部的开关和线路接负载（灯泡），在保护器内部两条导线上绕有线圈，该线圈与另一组绕在铁芯上的线圈连接。当人体没有接触导线时，流过两根导线的电流大小相等，方向相反，它们产生大小相等方向相反的磁场，这两个磁场相互抵消，绕在这两根导线上的线圈中不会产生电动势，衔铁不动作。

一旦人体接触导线，如图 5-6 所示，一部分电流会经人体直接到地，再通过大地回到电源的另一端，这样流过保护器内部两根导线的电流就不相等，它们产生的磁场也就不相等，不能完全抵消，即绕在两根导线上的线圈有磁场穿过，线圈会产生电流，电流流入绕在铁芯上的线圈，线圈产生磁场吸引衔铁，将开关断开，切断了供电，触电的人就得到了保护。

2. 漏电保护器的使用与检测

图 5-7 是两种常见的漏电保护器，在使用前，为了检验保护器的性能，在通电的情况下按下“试验”按钮，保护器上的开关马上由“ON（接通）”跳至“OFF（断开）”位置，内部的触点开关断开。

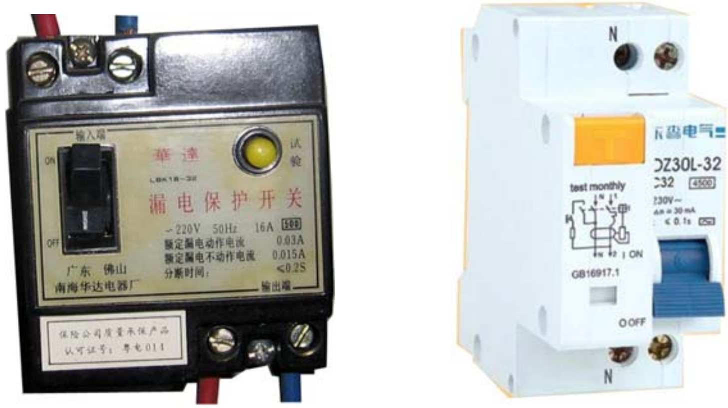


图 5-7　两种常见的漏电保护器

漏电保护器的检测与断路器基本相同，先将开关拨至“ON”位置，用万用表的×1Ω挡或×10Ω挡测量保护器的输入接线端与对应输出接线端是否相通（阻值为 0），相通则正常，否则断路器内部损坏。然后将开关拨至“OFF”位置，测量输入接线端和对应输出接线端的阻值，正常应为无穷大，否则断路器内部损坏。

5.4 接　触　器

接触器是一种利用电磁、气动或液压操作原理来控制内部触点频繁通断，从而实现频繁接通和切断交、直流电路的器件。

接触器种类很多，按通过的电流不同，接触器可分为交流接触器和直流接触器；按操作方式不同，接触器可分为电磁式接触器、气动式接触器和液压式接触器。其中电磁式接触器最为常用。

5.4.1　交流接触器

1. 外形与符号

交流接触器外形与符号如图 5-8 所示。

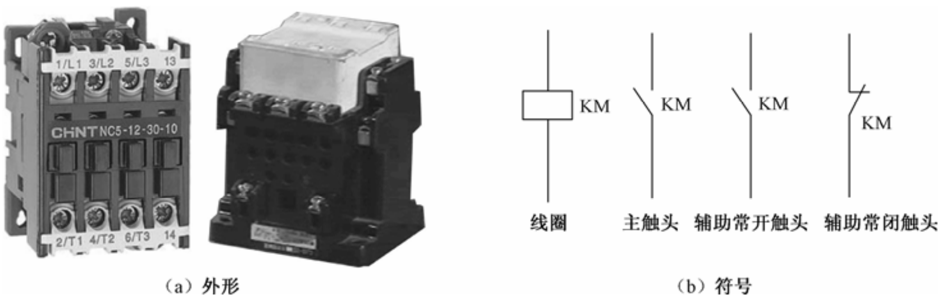


图 5-8　交流接触器

2．结构与工作原理

交流接触器典型的结构如图 5-9 所示。

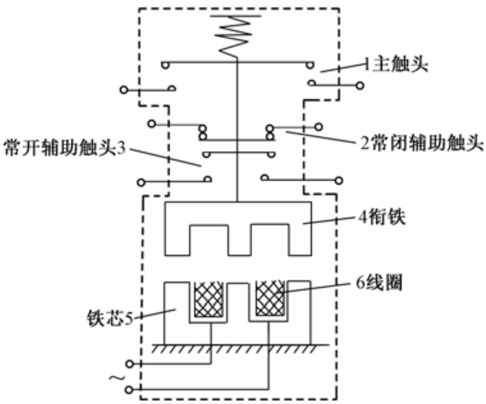
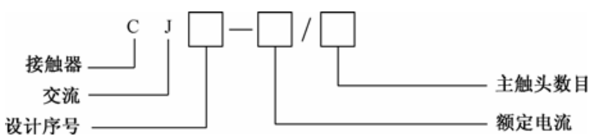


图 5-9　交流接触器的结构与符号

图中的接触器有一个主触头、一个常闭辅助触头和一个常开辅助触头。三个触头通过连杆与衔铁连接，在没有给线圈通电时，主触头和常开辅助触头处于断开状态，常闭辅助触头处于闭合状态。如果给线圈通交流电，线圈马上产生磁场，磁场通过铁芯吸引衔铁，而衔铁则通过连杆带动三个触头的动触头动作，与各自的静触点接触或断开。图 5-8 中的交流接触器有 4 对接线端，3 对内接触点，1 对外接控制信号、内接线圈。

3．型号含义

交流接触器型号含义说明如下：



5.4.2　直流接触器

直流接触器主要用于远距离切断和接通直流电力线路，频繁控制直流电动机启动、停止、正反转等。直流接触器的结构与工作原理与交流接触器基本相同，不同点主要在于直流接触器

流入内部线圈的电流为直流电，而交流接触器线圈流入的是交流电。

（1）实物外形

如图 5-10 所示是几种常见的直流接触器。

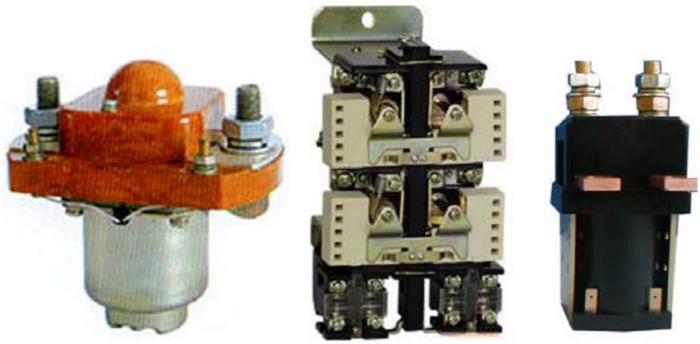
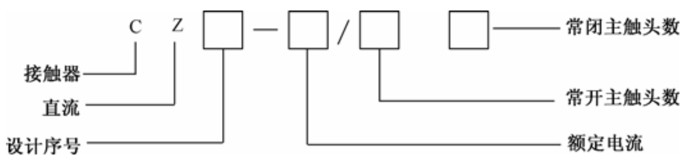


图 5-10　几种常见的直流接触器

（2）型号与参数

直流接触器型号含义说明如下：



5.4.3　接触器的选用

在选用接触器时，要注意以下事项：

① **根据负载的类型选择不同的接触器。**通常直流负载选用直流接触器，交流负载选用交流接触器。

② **选择的接触器额定电压应大于或等于所接电路的电压，线圈电压应与所接电路电压相同。**接触器的额定电压是指主触点的额定电压。

③ **选择的接触器额定电流应大于或等于负载的额定电流。**接触器的额定电流是指主触点的额定电流。

对于额定电压为 380V 的中、小功率电动机，其额定电流可按 $I_{额}=2P_{额}$来估算，如额定电压为 380V、额定功率为 3kW 的电动机，其额定电流 $I_{额}=2\times3=6$（A）。

④ **选择接触器时，要注意主触点和辅助触点数应符合电路的需要。**

5.4.4　接触器的检测

接触器的检测通常使用万用表的×1Ω挡或×10Ω挡，检测时一般分为两个步骤。

第一步：如图 5-11（a）所示，用万用表测量接触器的每对触点开关接线端之间的阻值，若阻值为 0，说明所测得为常闭触点开关；阻值无穷大，则为常开触点开关；若测得某对接线端之间的阻值大于 0（至少几欧姆以上），则所测的接线端内部为线圈。

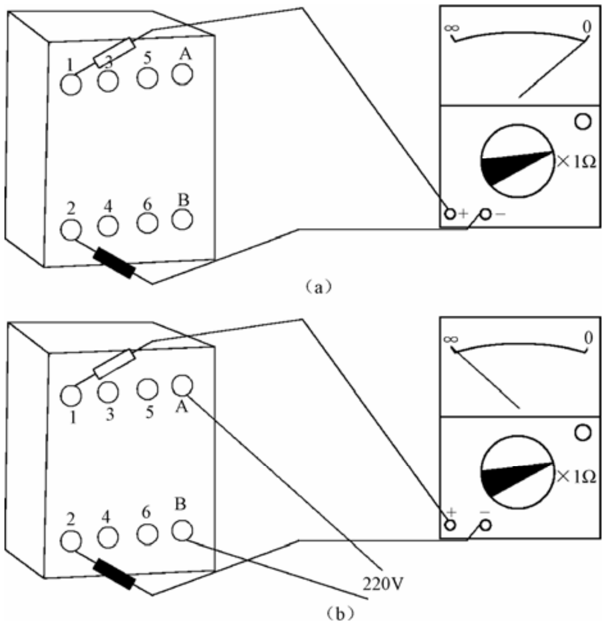


图 5-11　接触器的检测

第二步：给接触器的线圈接线端加控制电压，让接触器内部各触点开关产生动作，再用万用表测量每对触点开关接线端之间的阻值，如图 5-11（b）所示。如果接触器正常，这次测得的每对接线端之间的阻值应与前次测量的正好相反，如未加电压时，1、2 端阻值为 0，那么加电压后，1、2 端阻值应为无穷大。

在测量时，若发现某对接线端两次测量的阻值都相同，则说明该接线端内部触点开关状态不能切换，可以拆开接触器进行检修或直接更换。

5.5　继　电　器

继电器是一种根据电压、电流、温度、速度或时间等物理量变化来接通或切断电路的电器。继电器主要功能是保护和控制。常见的继电器有热继电器、电磁式继电器、时间继电器、速度继电器和压力继电器等。

5.5.1　热继电器

热继电器是利用电流通过发热元件时产生热量而使内部触点产生动作。热继电器主要用于电气设备发热保护，如电动机过载保护。热继电器说明见表 5-10。

表 5-10　热继电器说明

<table>
<tr><th>关键点</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td>外形与符号</td><td>热继电器的外形与符号如图 1 所示。



图 1　热继电器</td></tr>
<tr><td>结构与原理</td><td>热继电器的结构示意图如图 2 所示。

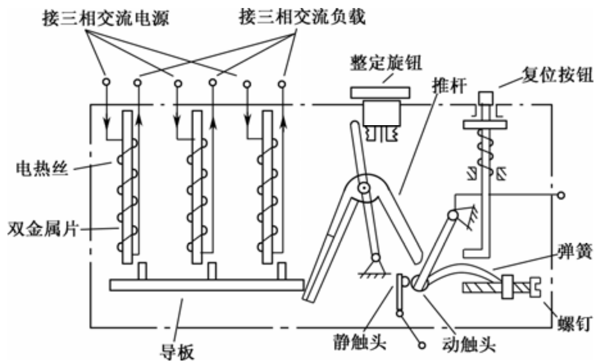
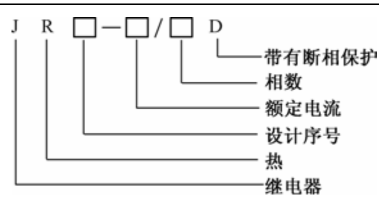


图 2　热继电器的典型结构

图中的热继电器由电热丝、双金属片、导板、推杆、动触片、静触片、弹簧、螺钉、复位按钮和整定旋钮等组成。

该热继电器有 4 组接线端，其中 1 组接线端内接触点，外接控制电路；另外 3 组串接在三相交流电源和三相交流负载之间，这 3 组接线端内接电热丝，电热丝绕在双金属片上，当负载过载时，流过电热丝的电流大，电热丝发热使双金属片向右弯曲，推动导板往右移动，导板推动推杆转动而使动触片运动，让动触点与静触点断开，从而向控制电路发出信号，让控制电路切断交流电源对负载供电（一般通过控制电路驱动接触器动作来切断电源）。

在切断交流电源后，电热丝温度下降，双金属片恢复到原状时，动触点和静触点会重新接触，这称为自动复位，出厂时热继电器一般被调至自动复位状态。如需手动复位，可将螺钉往外旋出数圈，然后按下复位按钮，即可实现手动使动触点和静触点接触（手动复位）。

整定旋钮的功能是通过调节推杆的位置来调节继电器动作的电流，例如旋钮往内旋时，推杆位置下移，导板需要移动较长的距离才能使推杆运动，而流过电热丝电流大，双金属片弯曲程度更大，才能达到这个要求。一般地，当流过热继电器的电流达到其整定电流的 1.2 倍时，继电器就会动作。</td></tr>
<tr><td>型号含义</td><td>
</td></tr>
</table>

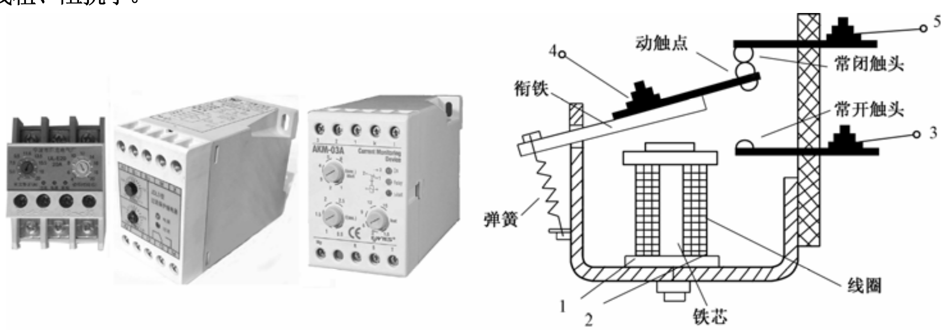
续表

关键点	说　　明
选用要求	热继电器在选用时，可按以下原则选择。 ①在大多数情况下，可选用两相热继电器（对于三相电压，热继电器可只接其中两相）。若三相电压均衡性较差且无人看管，或与大功率电动机共用一组熔断器的三相电动机，应该选用三相热继电器。 ②热继电器的额定电流应大于负载（一般为电动机）的额定电流。 ③热继电器的发热元件的额定电流应略大于负载的额定电流。 ④热继电器的整定电流一般与电动机的额定电流相等。对于过载容易损坏的电动机，整定电流可调小一些，约为电动机额定电流的 60%～80%；对于启动时间较长或带冲击性负载的电动机，所接热继电器的整定电流可稍大于电动机的额定电流 1.1～1.15 倍。 选用举例：选择一个热继电器用来对一台电动机进行过热保护，该电动机的额定电流为 30A，启动时间短，不带冲击性负载。根据热继电器的选择原则可知，应选择额定电流为 30A、发热元件额定电流略大于 30A、整定电流为 30A 的热继电器。

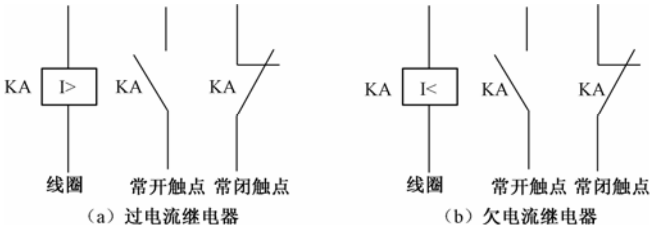
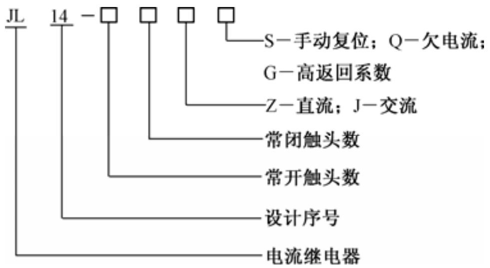
5.5.2　电流继电器

电流继电器是利用线圈通过电流产生磁场，来吸合衔铁而使触点断开或接通的。电流继电器在电路中可以用做过流和欠流保护。电流继电器说明见表 5-11。

表 5-11　电流继电器说明

关键点	说　　明
外形与结构	电流继电器的外形与结构如图 1 所示。从图 1（b）可以看出，继电器主要由线圈、铁芯、衔铁、弹簧、动断触点、动合触点和一些接线端等组成。 当线圈接线端 1、2 脚未通电时，依靠弹簧的拉力将动触点与常闭触点接触，4、5 脚接通。当线圈接线端 1、2 脚通电时，有电流流过线圈，线圈产生磁场吸合衔铁，衔铁移动，将动触点与常开触点接触，3、4 脚接通。 **电流继电器在使用时，应与电路串联，以监测电路电流的变化。电流继电器线圈的匝数少、导线粗、阻抗小。**  （a）外形　（b）结构 图 1　电流继电器
种类与符号	**电流继电器分为过电流继电器和欠电流继电器，分别在电流过大和电流过小时产生动作。**过电流继电器和欠电流继电器的符号分别如图 2（a）、（b）所示。

续表

关键点	说　　明
	 图 2　两种类型的电流继电器
型号含义	电流继电器型号很多，较常见的有 JL14 系列、JL15 系列和 JL18 系列。以 JL14 系列为例，其型号含义说明如下： 
选用要求	在选用过流继电器时，继电器的额定电流应大于或等于被保护电动机的额定电流，继电器动作电流一般为电动机额定电流的 1.7～2 倍，对于频繁启动的电动机，继电器动作电流要稍大些，约为额定电流的 2.25～2.5 倍。 在选用欠电流继电器时，欠电流继电器的额定电流不能小于电路的额定电流，其动作电流应小于电路正常时可能出现的最小电流。

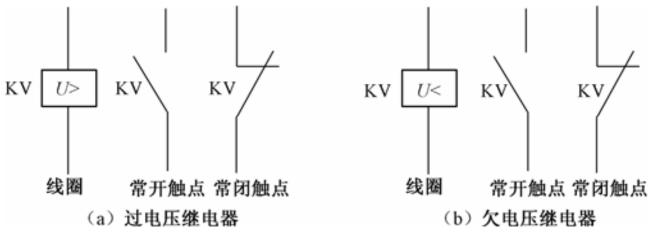
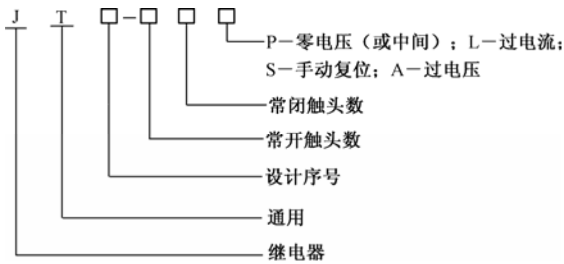
5.5.3　电压继电器

电压继电器的结构与电流继电器基本相同，但电压继电器的线圈匝数多、线径细、阻抗大。电压继电器在使用时应与电路并联，以监测电路电压的变化。电压继电器说明见表 5-12。

表 5-12　电压继电器说明

关键点	说　　明
外形	常见的电压继电器外形如图 1 所示。  图 1　常见的电压继电器外形

续表

关键点	说　　明
种类与符号	**电压继电器分为过电压继电器和欠电压继电器，分别在电压过高和电压过低时动作。**过电压继电器和欠电压继电器的符号分别如图 2（a）、（b）所示。  图 2　两种类型的电压继电器
型号含义	电压继电器型号很多，其中 JT4 系列较为常用，它常用在交流 50Hz、380V 及以下控制电路中，用做零电压、过电压和过电流保护。电压继电器型号含义说明如下： 

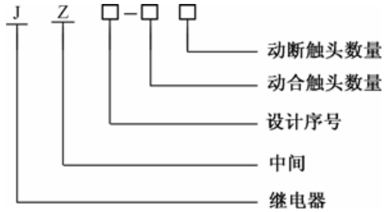
5.5.4　中间继电器

中间继电器是一种用来增加控制电路中信号的数量或将信号放大的继电器。中间继电器实际上也是电压继电器，但它的触点数量很多，其输入信号使线圈通电和断电，输出信号使多路触点动作。中间继电器说明见表 5-13。

表 5-13　中间继电器说明

关键点	说　　明
外形与符号	中间继电器外形和符号如图 1 所示。  图 1　中间继电器

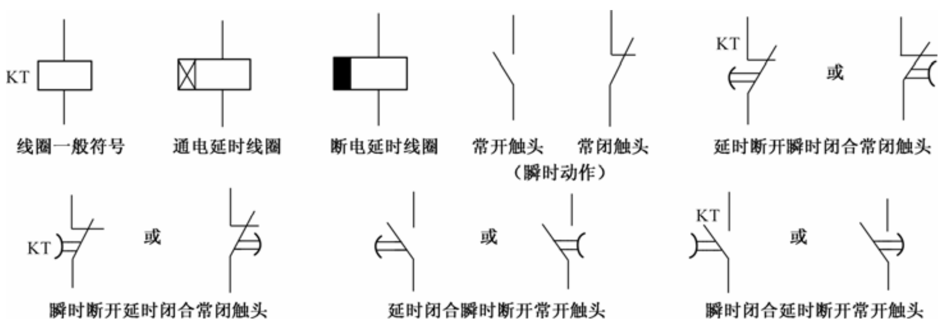
续表

关键点	说　　明
型号含义	
选用要求	在选用中间继电器时，主要考虑触点的额定电压和电流应等于或大于电路的电压和电流，触点类型及数量满足电路的要求，线圈电压与所接电路电压相同。

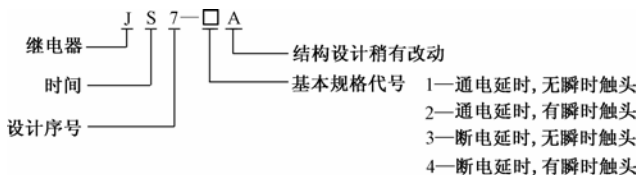
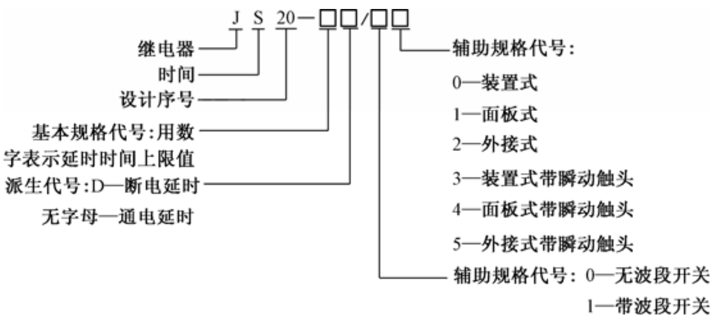
5.5.5　时间继电器

时间继电器是一种延时控制继电器，它在得到动作信号后并不是马上让触点动作，而是延迟一段时间才让触点动作。时间继电器主要用在各种自动控制系统和电动机的启动控制中。时间继电器说明见表 5-14 。

表 5-14　时间继电器说明

关键点	说　　明
外形	图 1 是一些常见的时间继电器。  图 1　一些常见的时间继电器
符号	时间继电器的符号如图 2 所示。由于时间继电器由线圈和触点两部分组成，因此时间继电器的符号也应含有线圈和触点，不同类型的线圈与触点组合，就可以构成不同工作方式的时间继电器。  图 2　时间继电器常见符号

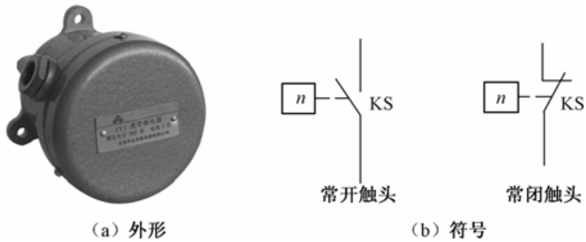
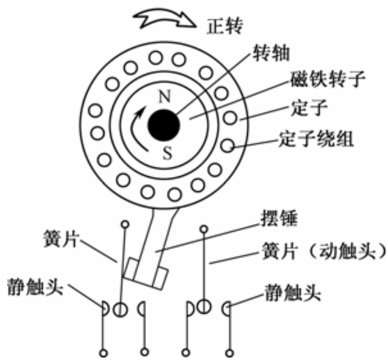
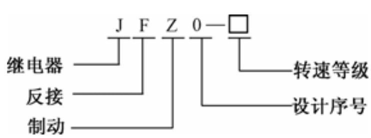
续表

关键点	说　　明
种类及特点	时间继电器的种类很多，主要有空气阻尼式、电磁式、电动式和晶体管式时间继电器。这些时间继电器有各自的特点，具体说明如下： ①空气阻尼式时间继电器又称气囊式时间继电器，它是根据空气压缩产生的阻力来进行延时的，其结构简单，价格便宜，延时范围大（0.4～180s），但延时精确度低。 ②电磁式延时时间短（0.3～1.6s），但它结构比较简单，通常用在断电延时场合和直流电路中。 ③电动式时间继电器原理与钟表类似，它是由内部电动机带动减速齿轮转动而获得延时的。这种继电器延时精度高，延时范围宽（0.4～72h），但结构比较复杂，价格很贵。 ④晶体管式时间继电器又称电子式时间继电器，它是利用延时电路来进行延时的。这种继电器精度高、体积小。
型号含义	时间继电器种类较多，不同种类型号命名差距较大，这里只介绍较常见的空气阻尼式时间继电器和晶体管式时间继电器的型号含义。 JS7 系列空气阻尼式时间继电器型号含义说明如下：  JS20 系列晶体管式时间继电器型号含义说明如下： 
选用要求	在选用时间继电器时，一般可按下面一些原则进行选择： ①根据受控电路的需要，来决定选择时间继电器是通电延时型或断电延时型。 ②根据受控电路的电压，来选择时间继电器吸引线圈的电压。 ③若对延时要求高，可选择晶体管式时间继电器或电动式时间继电器；若对延时要求不高，可选择空气阻尼式时间继电器。

5.5.6　速度继电器

速度继电器是一种当转速达到规定值时而产生动作的继电器。速度继电器在使用时需要与电动机的转轴连接在一起。速度继电器说明见表 5-15。

表 5-15 速度继电器说明

关键点	说　　明
外形与符号	速度继电器的外形与符号如图 1 所示。  图 1　速度继电器
结构与原理	速度继电器的结构如图 2 所示。  图 2 速度继电器的结构 速度继电器主要由转子、定子、摆锤和触点组成。转子是由永久磁铁制成的，定子内圆表面嵌有线圈（定子绕组）。 在使用时，将速度继电器转轴与电动机的转轴连接在一起，电动机运转时带动继电器的磁铁转子旋转，继电器的定子绕组上会产生感应电流，此电流产生磁场与磁铁转子的磁场相互作用，使定子转动一个角度，定子转向与转度分别由磁铁转子的转向与转速决定。当转子转速达到一定值时，定子会偏转到一定角度，与定子连动的摆锤也偏转到一定的角度，会碰压动触点使常闭触点断开、常开触点闭合。当电动机速度很慢或为零时，摆锤偏转角很小或为零，动触点自动复位，常闭触点闭合、常开触点断开。
型号含义	JFZ0 系列速度继电器较为常用，其型号含义说明如下： 

5.5.7　压力继电器

压力继电器能根据压力的大小来决定触点的接通和断开。压力继电器常用在机械设备的液压或气压控制系统中，对设备提供保护或控制。压力继电器说明见表 5-16。

表 5-16　压力继电器说明

<table>
<tr><th>关键点</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td>外形与符号</td><td>
压力继电器的外形与符号如图 1 所示。



图 1　压力继电器
</td></tr>
<tr><td>结构与原理</td><td>
压力继电器的结构如图 2 所示。从图中可以看出，压力继电器主要由缓冲器、橡皮膜、顶杆、压力弹簧、调节螺母和微动开关组成。

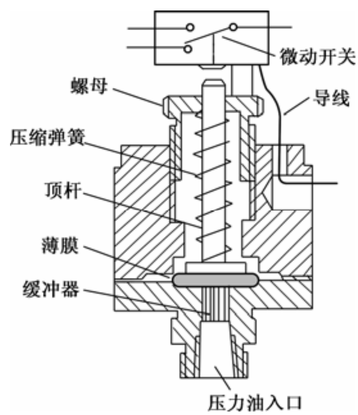


图 2　压力继电器的结构

在使用时，压力继电器装在油路（或气路、水路）的分支管路中，当管路中的油压超过规定值时，压力油通过缓冲器、薄膜推动顶杆，顶杆克服弹簧的压力碰压微动开关，使微动开关的常闭触点断开、常开触点闭合。当油路压力减小到一定值时，依靠压力弹簧的作用，顶杆复位，微动开关的常闭触点接通、常开触点断开。调节压力螺母可以调节压力继电器的动作压力。
</td></tr>
</table>

5.5.8 继电器的检测

继电器的检测通常使用万用表的 R×1Ω挡或 R×10Ω挡，其检测过程如图 5-12 所示。具体操作如下。

① 检测各触点类型，并找出线圈。如图 5-12（a）所示，用万用表测量继电器的每对触点

接线端之间的阻值，若阻值为 0，说明所测得为常闭触点；若阻值无穷大，则为常开触点；若测得某对接线端之间的阻值大于 0（至少几欧姆以上），则所测的接线端内部为线圈。

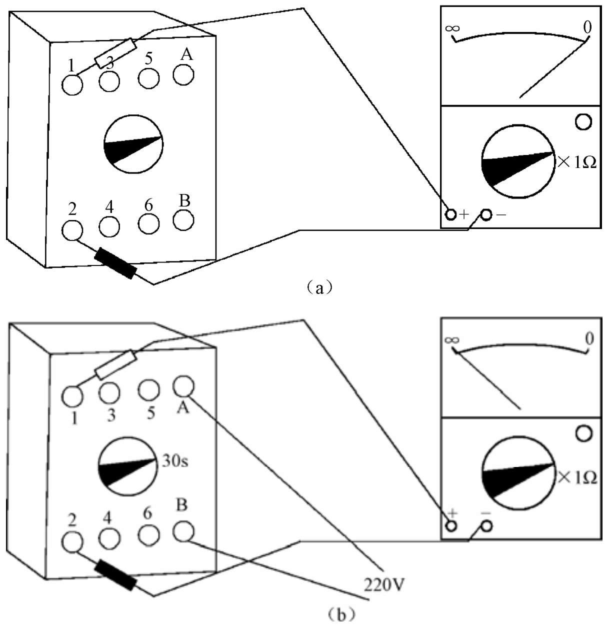


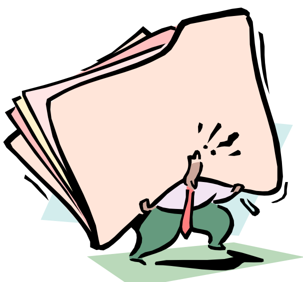
图 5-12　继电器的检测

② 检测继电器的性能。根据继电器的类型，给继电器的线圈接线端加控制信号，检查其触点是否会切换来判断继电器的性能。以检测通电延时型时间继电器为例，如图 5-12（b）所示，将时间继电器的延迟时间调至 30s，然后给继电器的线圈端加上控制电压，等待约 30s 时间，再测量各对触点的阻值，如果继电器正常，这次测得各触点的阻值应与线圈未加控制电压时的测量值相反，如未加电压时，1、2 端阻值为 0，那么加电压并等待 30s 后，1、2 端阻值应为无穷大。

在测量时，若发现某触点两次测量的阻值都相同，则说明该接线端内部触点状态不能切换，可以拆开继电器进行检修。

第6章

室内配电线路的安装



问： 老师，能简单介绍一下室内配电线路的安装吗？



答： 室内配电线路安装主要包括照明光源的安装、导线的选择与安装、插座与开关的安装以及配电箱的安装等。

室内配电线路安装好后，在室内可以获得照明，可以通过插座为各种家用电器供电，在电器出现过载和人体触电时能实现自动保护，另外还能对室内的用电量进行记录等。

6.1 照明光源

在室内安装照明光源是配电线路安装最基本的要求。照明光源的种类很多，常见的有白炽灯、荧光灯、卤钨灯、高压汞灯和高压钠灯等。

6.1.1 白炽灯

白炽灯是一种最常用的照明光源，它有卡口式和螺口式两种，如图 6-1 所示。

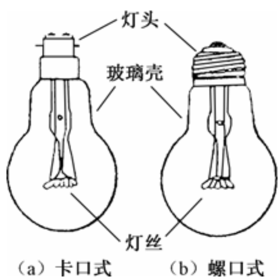


图 6-1 白炽灯

白炽灯内的灯丝为钨丝，当通电后钨丝温升高到 2200～3300℃而发出强光。当灯丝温度太高时，会引起钨丝蒸发过快而降低寿命，且蒸发后的钨沉积在玻璃壳内壁上，会使壳内壁发黑而影响亮度，为此 60W 以上的白炽灯通常充有适量的惰性气体（氦、氩、氪等），这样可以减少钨丝的蒸发。

在选用白炽灯时，要注意其额定电压要与所接电源电压一致。若电源电压偏高，如电压偏高 10%，其发光效率会提高 17%，但寿命会缩短到原来的 28%；若电源电压偏低，其发光效率会下降，但寿命会延长。

白炽灯在安装时要注意以下事项：

（1）白炽灯座安装高度通常要在 2m 以上，环境差的场所要达 2.5m 以上。

（2）照明开关的安装高度不应低于 1.3m。

（3）对于螺口灯座，应将灯座的螺旋铜圈极与市电的零线（或称中性线）相连，火线（即相线）与灯座中心的铜极相连接。

6.1.2 荧光灯

荧光灯又称日光灯，它是一种利用气体放电而发光的光源。荧光灯具有光线柔和、发光效率高和寿命长等特点。

1．工作原理

荧光灯主要由荧光灯管、启辉器和镇流器组成。荧光灯的结构及电路连接如图 6-2 所示。

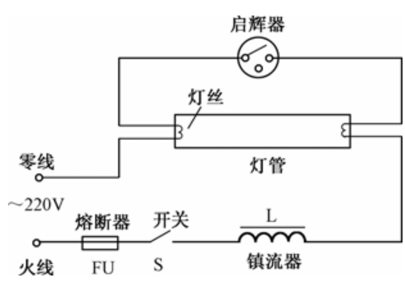


图 6-2　荧光灯的结构及电路连接

荧光灯的工作原理说明如下：

当闭合电源开关 S 时，220V 电压通过熔断器、开关 S、镇流器和灯管的灯丝加到启辉器两端，由于启辉器内部的动、静触片距离很近，两触片间的电压使中间的气体电离发出辉光，辉光的热量使动触片弯曲，与静触片接通，于是电路中有电流通过，其途径是：火线→熔断器→开关→镇流器→右灯丝→启辉器→左灯丝→零线，该电流流过荧光管两端灯丝，灯丝温度升高，当升高到 850～900℃时，荧光管内的汞蒸发就变成气体，与此同时，由于启辉器动、静触片的接触而使辉光消失，动触片无辉光加热又恢复原样，从而使得动、静触片又断开，电路被突然切断，流过镇流器（实际是一个电感）的电流突然减小，它两端马上产生很高的反峰电压，该电压与 220V 电压相叠加，送到荧光管的两灯丝之间（即两灯丝间的电压为 220V 加上镇流器上的高压），高压使荧光管两灯丝间的汞蒸气电离，同时发出紫外线，紫外线激发灯管壁上的荧光粉发光。

荧光管内的汞蒸气电离后，汞蒸气变成导电的气体，它一方面发出紫外线激发荧光粉发光，另一方面将两灯丝电气连通。两灯丝通过电离的汞蒸气接通后，两灯丝之间的电压下降（100V 以下），启辉器两端的电压也下降，无法产生辉光，内部动、静触片处于断开状态，这时取下启辉器，灯管照样发光。

2．荧光灯各部件说明

荧光灯各部件说明见表 6-1。

表 6-1　荧光灯各部件说明

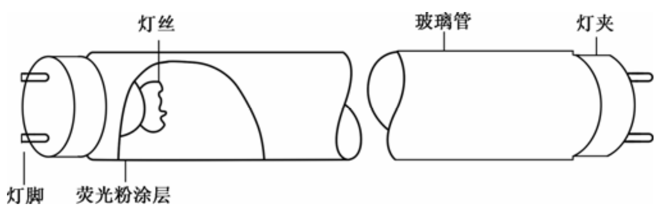
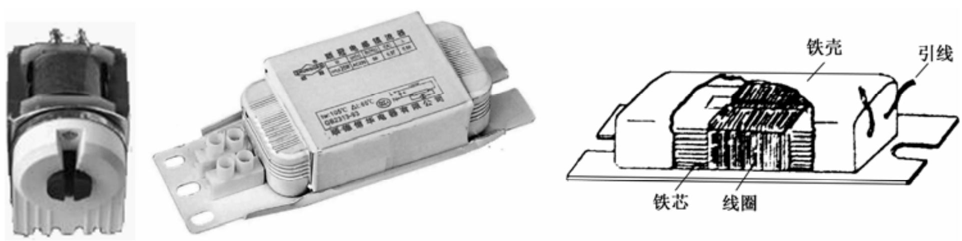
<table>
<tr><th>部件</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td>荧光灯管</td><td>荧光灯管的结构如图 1 所示。


图 1　荧光灯管的结构
荧光灯管的功率与管径大小有一定的关系，一般来说管径越粗，其功率越大。下表列出了一些荧光灯管的管径尺寸与所对应的功率。
<table>
<tr><td>管径直径代号</td><td>T5</td><td>T8</td><td>T10</td><td>T12</td></tr>
<tr><td>管径尺寸/mm</td><td>15</td><td>25</td><td>32</td><td>38</td></tr>
<tr><td>灯管功率/W</td><td>4，6，8，12，13</td><td>10，15，18，30，36</td><td>15，20，30，40</td><td>15，20，30，40，65，80，85，125</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>启辉器</td><td>**启辉器是一只辉光放电管与一只小电容器并联而成的。**启辉器的外形和结构如图 2 所示。辉光放电管的外形与内部结构如图 3 所示。</td></tr>
</table>

续表

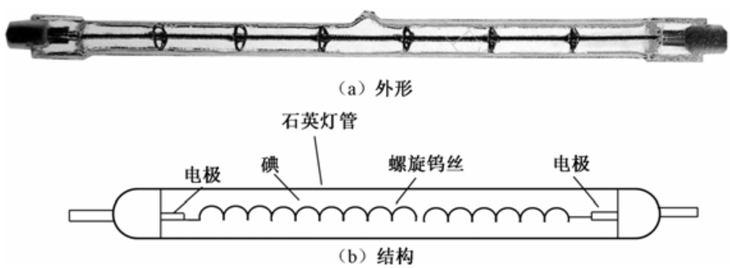
部件	说　明
	 （a）外形　（b）结构 图 2　启辉器的外形和结构  （a）外形　（b）结构 图 3　辉光放电管的外形与内部结构 从图 3 可以看出，辉光放电管内部有一个动触片（U 形双金属片）和一个静触片，在玻璃管内充有氖气或氩气，或氖、氩混合惰性气体。当动、静触片之间加有一定的电压时，中间的惰性气体被击穿导电而出现辉光放电，动触片被辉光加热而弯曲与静触片接通。动、静触片接通后不再发生辉光放电，动触片开始冷却，经过 1～8s 的时间，动触片收缩回原来状态，动、静触片又断开，此时荧光管已导通，放电管动、静触片两端的电压很低，无法再击穿惰性气体产生辉光。另外，在辉光放电管两端一般并联一个电容，用来消除动、静触片通断时产生的干扰信号，防止干扰无线电接收设备（如电视机和收音机）。
镇流器	**镇流器实际上是一个电感量较大的电感器，它是由线圈绕制在铁芯上构成的。**镇流器的外形及结构如图 4 所示。  （a）外形　（b）结构 图 4　镇流器的外形及结构 电感式镇流器体积大、笨重，并且成本高，故现在很多荧光灯采用电子式镇流器。电子式镇流器采用电子电路来对荧光灯进行启动，同时还可以省去启辉器。

6.1.3　卤钨灯

卤钨灯是在白炽灯的基础上改进而来的，在充有惰性气体的白炽灯内再加入卤族元素（如氟、碘、溴等）就制成了卤钨灯。第一只实用的卤钨灯是 1959 年由美国通用电气公司研制成

功的管型碘钨灯。由于卤钨灯具有体积小、发光效率高、色温稳定、几乎无光衰、寿命长等优点，问世后发展十分迅速，有逐渐取代白炽灯的趋势。卤钨灯说明见表 6-2。

表 6-2　卤钨灯说明

关键点	说　　明
结构与原理	**根据充入的卤族元素的不同，卤钨灯可分为碘钨灯、溴钨灯等，**这里以碘钨灯为例来介绍卤钨灯。常见的碘钨灯外形与结构如图 1 所示。  图 1　碘钨灯外形与结构 卤钨灯的石英灯管两端为电极，电极之间连接着钨丝，石英灯管内部充有惰性气体和碘。当给卤钨灯两个电极接上电源时，有电流流过钨丝，钨丝发热，钨丝因高温使部分钨蒸发而成为钨蒸气，它与灯管壁附近的碘发生化学反应而生成气态的碘化钨，通过对流和扩散碘化钨又返回到灯丝的高温区，高温将碘化钨分解成钨和卤素，钨沉积在灯丝表面，而碘则扩散到温度较低的灯管内壁附近，再继续与蒸发的钨进行化合反应。这个过程会不断循环，从而使钨灯丝不会因蒸发而变细，灯管壁上也不会有钨沉积，灯管始终保持透亮。
使用注意事项	卤钨灯在使用安装时要注意以下事项： ①卤钨灯对电源电压稳定要求较高，当电压超过灯额定电压的 5%时，灯的寿命会缩短 50%，因此要求电源电压变化在 2.5%范围内。 ②卤钨灯要求水平安装，若倾斜超过±4°，会严重影响其使用寿命。 ③卤钨灯工作时，管壁温度很高（近 600℃），所以安装位置应远离易燃物，并且要加灯罩，接线最好采用耐高温导线。

6.1.4　高压汞灯

高压汞灯又称高压水银灯，它是一种利用气体放电而发光的灯。高压汞灯说明见表 6-3。

表 6-3　高压汞灯说明

关键点	说　　明
结构与原理	高压汞灯的实物外形和结构如图 1 所示。 从图中可以看出，高压汞灯由两个玻璃管组成，外玻璃管内部装着一个小玻璃管，外玻璃管内壁涂有荧光粉，内玻璃管又称放电管，它接有两个主电极和一个辅助电极，辅助电极上串有一个电阻，在放电管内部充有汞和氩气。

续表

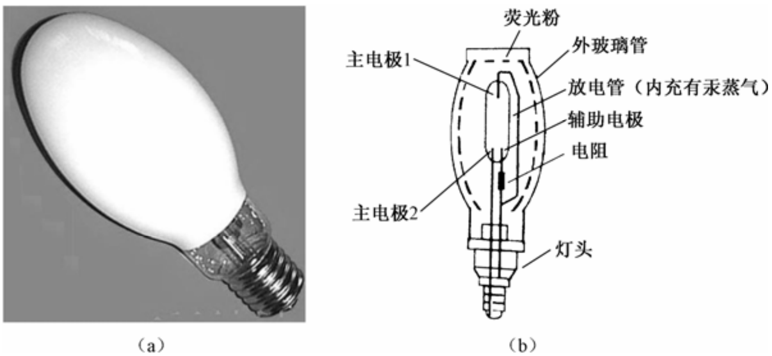
<table>
<tr><th>关键点</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td></td><td>


图 1　高压汞灯的实物外形和结构

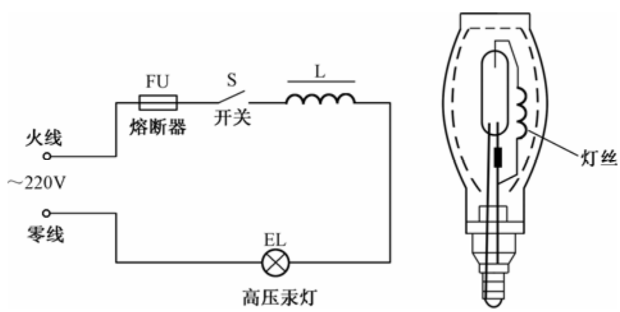
在通电时，电压通过灯头加到主电极 1 和主电极 2，送给主电极 1 的电压另经过一个电阻加到辅助电极上。由于辅助电极与主电极 2 距离近，它们之间首先放电产生辉光，放电管内的气体电离，由于气体的电离，主电极 1 和主电极 2 之间也产生放电而发出白光，两主电极导通使它们之间的电压降低，因电阻的降压，主电极 2 与辅助电极之间的电压更低，它们之间放电停止。随着两主电极间的放电，放电管内温度升高，汞蒸气气压增大，放电管发出更明亮的可见蓝绿色光和不可见的紫外线，紫外线照射外玻璃内壁上的荧光粉，荧光粉也发出光线。
由此可见，高压汞灯通电后，并不是马上就会发出强光，而是光线慢慢变亮，这个过程称为高压汞灯的启动过程，耗时 4～8min。
</td></tr>
<tr><td>线路连接</td><td>
高压汞灯具有负阻特性，即两主电极之间的电阻随着温度升高而变小，这是因为温度高，汞蒸气放电更彻底，通过的电流更大。这样就会出现温度升高→两主电极间的电阻更小→电流更大→温度更高的情况，随着温度不断升高，放电管内的气压不断增大，高压汞灯很容易损坏，所以需要给高压汞灯串接一个镇流器，对汞灯的电流进行限流，防止电流过大。高压汞灯与镇流器的连接如图 2 所示。


图 2　高压汞灯与镇流器的连接

目前，市面上已出现一种不用镇流器的高压汞灯，它是在高压汞灯内部一个主电极上串接一根钨丝作为灯丝，如图 2 所示。高压汞灯在工作时，有电流流过灯丝，灯丝发光，另外灯丝因发热而阻值变大，并且温度越高阻值越大，这正好与放电管温度越高阻值越小相反，从而限制流过放电管电流过大。这种高压汞灯具有光色种类多、启动快和使用方便等优点。
</td></tr>
</table>

续表

关键点	说　　明
使用注意事项	在安装使用高压汞灯时，要注意以下事项： ①高压汞灯要求电源电压稳定，当电压降低 5%时，所需的启动时间长，并且容易自灭。 ②高压汞灯要垂直安装，若水平安装，亮度会降低，并且容易自灭。 ③如果选用普通的高压汞灯，需要串接镇流器，并且镇流器功率要与高压汞灯一致。 ④高压汞灯外玻璃管破裂后，仍可以发光，但会发出大量的紫外线，对人体有危害，应更换处理。 ⑤若在使用高压汞灯时突然关断电源，再通电点燃时，时间间隔应为 10～15min。

6.2　导线的选择与连接

6.2.1　导线的选择

导线种类很多，通常可分为两大类：裸导线和绝缘导线。裸导线是不带绝缘层的导线，一般用做电能的传输，由于无绝缘层，故需要架设在位置高的地方，出于安全考虑，室内配电线路很少采用裸导线，而主要采用绝缘导线。

1．绝缘导线的种类

绝缘导线是在金属导线（如铜、铝）外面加上绝缘层构成。绝缘导线有漆包线、普通绝缘导线和护套绝缘导线。常见的绝缘导线说明见表 6-4。

表 6-4　常见的绝缘导线说明

类型	说　　明
漆包线	**漆包线是在铜线的外面涂上绝缘漆构成的，绝缘漆就是它的绝缘层，**由于很多绝缘漆颜色与铜相似，因此很容易将漆包线当成裸铜线。漆包线如图 1 所示。  图 1　漆包线 **电动机、变压器、继电器、接触器和电工仪表等设备中的线圈通常是由漆包线绕制而成的。**漆包线的线径和横截面积是由铜导线来决定的，线径越粗、横截面积越大，允许流过的电流也越大。下表列出了一些不同规格漆包线的有关参数。

续表

类型	说明

漆包线规格表

线径/mm	线截面积/mm^2	相当英制号	每千米电阻/Ω	最大安全电流/A	线径/mm	线截面积/mm^3	相当英制号	每千米电阻/Ω	最大安全电流/A
4.00	12.50	8	1.32	36.6	0.40	0.125	27	135.9	0.39
3.55	10.00	9	1.68	29.6	0.36	0.10	28	172.1	0.31
3.15	8.00	10	2.11	23.3	0.32	0.08	30	217.4	0.22
2.80	6.30	11	2.63	19.3	0.28	0.063	32	273.9	0.17
2.50	5.00	12	3.32	15.4	0.25	0.05	33	357.0	0.14
2.24	4.00	13	4.22	12.1	0.22	0.04	34	431.5	0.12
2.00	3.15	14	5.31	9.2	0.20	0.032	36	558.0	0.083
1.80	2.50	15	6.71	7.4	0.18	0.025	37	691.5	0.066
1.60	2.00	16	8.44	5.9	0.16	0.020	38	873	0.051
1.40	1.60	17	10.65	4.5	0.14	0.016	39	1140	0.039
1.12	1.00	18	16.96	3.1	0.125	0.012	40	1389	0.033
1.00	0.80	19	21.39	2.3	0.112	0.010	41	1751	0.028
0.90	0.63	20	26.95	1.9	0.10	0.008	42	2240	0.023
0.80	0.50	21	35.00	1.5	0.09	0.0063	43	2860	0.019
0.71	0.40	22	42.57	1.1	0.08	0.0052	44	3508	0.015
0.63	0.31	23	53.95	0.9	0.07	0.004	45	4308	0.011
0.56	0.25	24	67.95	0.7	0.06	0.003	46	5470	0.0083
0.50	0.20	25	85.10	0.6	0.05	0.002	47	6900	0.0057
0.45	0.16	26	103.3	0.46	0.04	0.0014	48	8700	0.0037

普通绝缘导线

普通绝缘导线由金属芯线和绝缘层组成。根据绝缘层不同，可分为塑料绝缘导线和橡胶绝缘导线；根据芯线材料的不同，可分为铜芯绝缘导线和铝芯绝缘导线；根据芯线的数量不同，可分为单股和多股绝缘导线；根据导线的形式不同，可分为绝缘双绞线和绝缘平行线。常见种类的绝缘导线如图 2 所示。

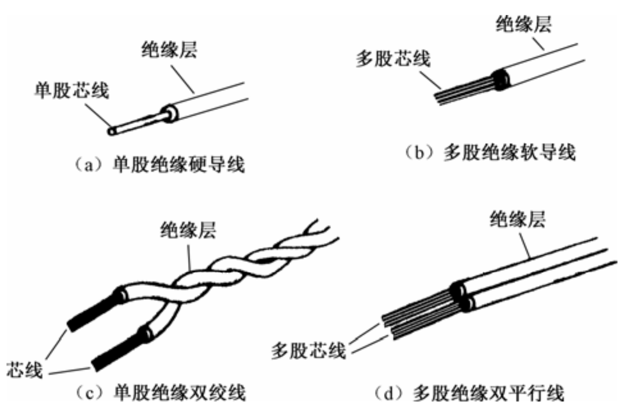
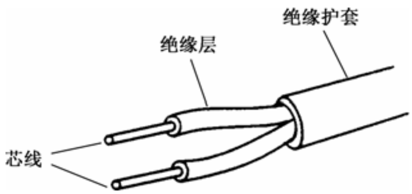


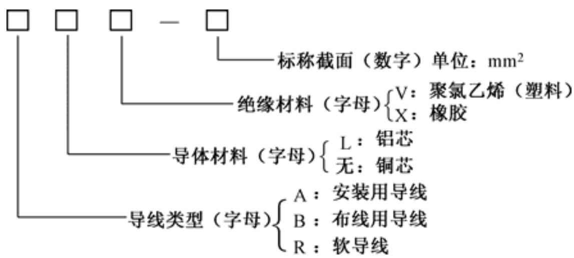
图 2　常见种类的绝缘导线

续表

类型	说　　明
护 套绝 缘 导线	**护套绝缘导线是在普通绝缘导线的基础上再外套一个绝缘护套构成的。**护套绝缘线如图 3 所示。  图 3　护套绝缘线

2．绝缘导线的型号

绝缘导线通常会在线体或标签上标有型号，用来说明导线的种类等参数。**绝缘导线型号含义说明如下：**



例如某绝缘导线的型号为 BLV，该型号说明该导线是布线用的铝芯塑料绝缘导线。

3．绝缘导线的选择

在选用绝缘导线时，主要考虑导线的安全电流、机械强度和额定电压。

（1）安全电流

导线流过电流时会发热，电流越大，发出热量越多，热量通过绝缘层散发出去，如果散发的热量等于导线发出的热量，导线的温度不再上升，若流过导线的电流过大而产生大量的热量，这些热量又不能被绝缘层都散发出去，导线的温度就会上升，绝缘层就容易老化甚至损坏，引起触电或火灾事故。

安全电流是指导线温度达到绝缘层最高允许值（规定为 65℃）不再上升时的导线电流。当流过绝缘导线的电流超过安全电流时，绝缘层温度就会超过最高允许值而易损坏。安全电流大小除了与导线横截面积有关（如截面积越大，导线电阻越小，产生的热量越少，安全电流越大），还与绝缘层有很大的关系，绝缘层散热性能越好，导线安全电流越大，因此芯线截面积相同的普通单绝缘层导线比护套绝缘导线安全电流大，单股绝缘导线较多股绝缘导线安全电流大。

在选择绝缘导线时，导线的安全电流应大于所接负载的总电流，一般为 1.5～2 倍。

表 6-5 和表 6-6 分别列出了不同截面积芯线的塑料绝缘导线和橡胶绝缘导线在不同情况下的安全电流大小。从任意一个表中都可以看出，同截面积芯线的绝缘导线，采用明线敷设、穿管敷设（安装时将导线放在套管中）和护套线形式敷设时的安全电流不同，散热好的明线敷设时的安全电流最大，多芯护套线敷设时的安全电流最小。另外将两个表进行比较，还可以发现

相同截面积芯线的塑料绝缘导线比橡胶绝缘导线安全电流要大。

表 6-5　不同截面积芯线的塑料绝缘导线在不同的情况下的安全电流大小

截面积/mm²	明线敷设		穿管敷线						护套线			
			二根		三根		四根		二芯		三芯及四芯	
	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
0.2	3								3		2	
0.3	5								4.5		3	
0.4	7								6		4	
0.5	8								7.5		5	
0.6	10								8.5		6	
0.7	12								10		8	
0.8	15								11.5		10	
1	18		15		14		13		14		11	
1.5	22	17	18	13	16	12	15	11	18	14	12	10
2	26	30	20	15	17	13	16	12	20	16	14	12
2.5	30	23	26	20	25	19	23	17	22	19	19	15
3	32	24	29	22	27	20	25	19	25	21	22	17
4	40	30	38	29	33	25	30	23	33	25	25	20
5	45	34	42	31	37	28	34	25	37	27	28	22
6	50	39	44	34	41	31	37	28	41	31	31	24
8	63	48	56	43	49	39	43	34	51	39	40	30
10	75	55	68	51	56	42	49	37	63	48	48	37
16	100	75	80	61	72	55	64	49				
20	110	85	90	70	80	65	74	56				
25	130	100	100	80	90	75	85	65				
35	160	125	125	96	110	84	105	75				
50	200	155	163	125	142	109	120	89				
70	255	200	202	156	182	141	161	125				
95	310	240	243	187	227	175	197	152				

表 6-6　不同截面积芯线的橡胶绝缘导线在不同的情况下的安全电流大小

截面积/mm²	明线敷设		穿管敷线						护套线			
			二根		三根		四根		二芯		三芯及四芯	
	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
0.2									3		2	
0.3									4		3	
0.4									5.5		3.5	
0.5									7		4.5	
0.6									8		5.5	
0.7									9		7.5	
0.8									10.5		9	

续表

截面积/mm^2	明线敷设		穿管敷线						护套线			
			二根		三根		四根		二芯		三芯及四芯	
	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝	铜	铝
1.0	17		14		13		12		12		10	
1.5	20	15	16	12	15	11	14	10	15	12	11	8
2	24	18	18	14	16	12	15	11	17	15	12	10
2.5	28	21	24	18	23	27	21	16	19	16	16	13
3	30	22	27	20	25	18	23	17	21	18	19	14
4	37	28	35	26	30	23	27	21	28	21	21	17
5	41	31	39	28	34	26	30	23	33	24	24	19
6	46	36	40	31	38	29	34	26	35	26	26	21
8	58	44	50	40	45	36	40	31	44	33	34	26
10	69	51	63	47	50	39	45	34	54	41	41	32
16	92	69	74	56	66	50	59	45				
20	100	78	83	65	74	60	68	52				
25	120	92	92	74	83	69	78	60				
35	148	115	115	88	100	78	97	70				
50	185	143	150	115	130	100	110	82				
70	230	185	186	144	168	130	149	115				
95	290	225	220	180	210	160	180	140				
120	355	270	260	200	220	173	210	165				
150	400	310	290	230	260	207	240	188				

（2）机械强度

安装绝缘导线时，除了要考虑导线的安全电流外，在某些情况下还要考虑其机械强度。**机械强度是指导线承受拉力、扭力和重力等的能力。**如当遇到如图 6-3 所示的线路安装时就需要考虑导线的机械强度。

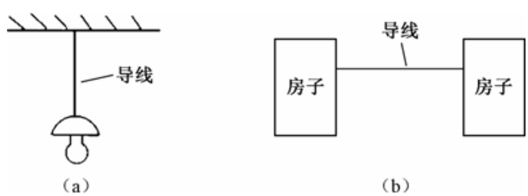


图 6-3　线路安装时需要考虑导线的机械强度的情况

在图 6-3（a）中，选择的绝缘导线要能承受灯具的重力，在图（b）中，选择的绝缘导线除了要能承受自身重力形成的拉力外，由于安装在室外，所以还要考虑到一些外界因素形成的力（如风力等）。

（3）额定电压

导线的绝缘层一般都有一定的耐压范围，超出这个范围绝缘性能下降。选择导线时，要根据线路的电压来选择相应额定电压的绝缘导线。常用的绝缘导线的额定电压有 250V、500V

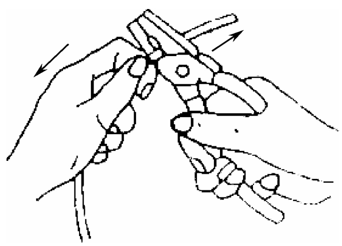
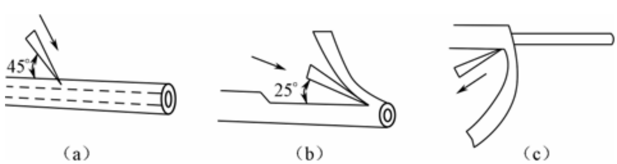
和 1000V 等，如线路实际电压为 220V，可选择额定电压为 250V 的绝缘导线。

6.2.2　导线的连接

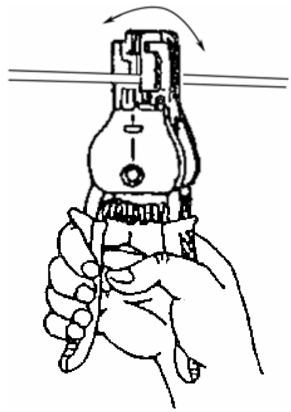
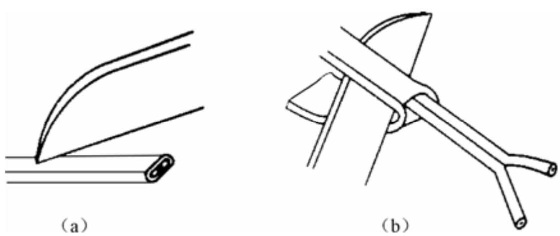
1．导线绝缘层的剥离

在连接绝缘导线前，需要先去掉导线连接处的绝缘层而露出金属芯线，再进行连接，剥离的绝缘层的长度一般为 50～100mm，通常线径小的导线剥离短些，线径粗的剥离长些。绝缘导线种类不同，绝缘层的剥离方法也有所不同。导线绝缘层剥离说明见表 6-7。

表 6-7　导线绝缘层剥离说明

关键点	说　　明
硬导线绝缘层的剥离	**对于截面积在 0.4mm² 以下的硬绝缘导线，可以使用钢丝钳（俗称老虎钳）剥离绝缘层，**具体如图 1 所示，其过程如下： ①左手捏住导线，右手拿钢丝钳，将钳口钳住剥离处的导线，切不可用力过大，以免切伤内部芯线。 ②左、右手分别朝相反方向用力，绝缘层就会沿钢丝钳运动方向脱离。 如果剥离绝缘层时不小心伤及内部芯线，较严重时需要剪掉切伤部分导线，重新按上述方向剥离绝缘层。  图 1　截面积在 0.4mm² 以下的硬绝缘导线绝缘层的剥离 **对于截面积在 0.4mm² 以上的硬绝缘导线，可以使用电工刀来剥离绝缘层，**具体如图 2 所示，其过程如下： ①左手捏住导线，右手拿电工刀，将刀口以 45°切入绝缘层，不可用力过大，以免切伤内部芯线，如图 2（a）所示。 ②刀口切入绝缘层后，让刀口和芯线保持 25°，推动电工刀，将部分绝缘层削去，如图 2（b）所示。 ③将剩余的绝缘层反向扳过来，如图 2（c）所示，然后用电工刀将剩余的绝缘层齐根削去。  图 2　截面积在 0.4mm² 以上的硬绝缘导线绝缘层的剥离

续表

关键点	说　明
软导线绝缘层的剥离	**剥离软导线的绝缘层可使用钢丝钳或剥线钳（如图 3 所示），但不可使用电工刀，**因为软导线芯线由多股细线组成，用电工刀剥离很容易切断部分芯线。用钢丝钳剥离软导线绝缘层的方法与剥离硬导线的绝缘层操作方法一样，这里只介绍如何用剥线钳剥离绝缘层，如图 4 所示，具体操作过程如下： ①将剥线钳钳入需剥离的软导线。 ②握住剥线钳手柄做圆周运动，让钳口在导线的绝缘层上切成一个圆周，注意不要切伤内部芯线。 ③往外推动剥线钳，绝缘层就会随钳口移动方向脱离。  图 3　剥线钳  图 4　用剥线钳剥离绝缘层
护套线绝缘层的剥离	护套线除了内部有绝缘层外，在外面还有护套，**在剥离护套线绝缘层时，先要剥离护套，再剥离内部的绝缘层。剥离护套常用电工刀，剥离内部的绝缘层根据情况可使用钢丝钳、剥线钳或电工刀。**护套线绝缘层的剥离如图 5 所示，具体过程如下： ①将护套线平放在木板上，然后用电工刀尖从中间划开护套，如图 5（a）所示。 ②将护套线折弯，再用电工刀齐根削去，如图 5（b）所示。 ③根据护套线内部芯线的类型，用钢丝钳、剥线钳或电工刀剥离内部绝缘层。若芯线是较粗的硬导线，可使用电工刀；若是较细的硬导线，可使用钢丝钳；若是软导线，则使用剥线钳。  图 5　护套线绝缘层的剥离

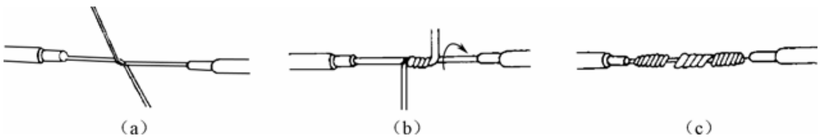
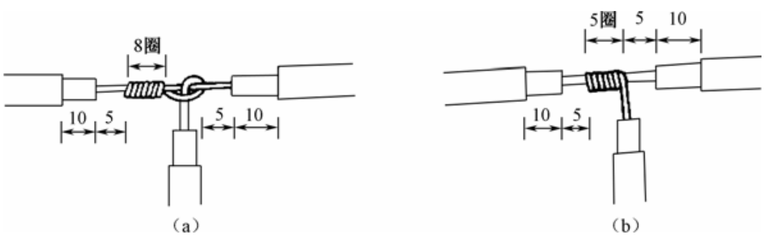
2．导线与导线的连接

当导线长度不够或接分支线路时，需要将导线与导线连接起来。**导线连接部位是线路的薄弱环节，正确进行导线连接可以增强线路的安全性、可靠性，使用电设备能稳定可靠地运行。在连接导线前，要求先去除芯线上污物和氧化层。**

（1）铜芯导线之间的连接

铜芯导线之间的连接说明见表 6-8。

表 6-8　铜芯导线之间连接说明

关键点	说　　明
单股铜芯导线的直线连接	单股铜芯导线的直线连接如图 1 所示，具体过程如下： ①将去除绝缘层和氧化层的两根单股导线作 X 形相交，如图 1（a）所示。 ②将两根导线向两边紧密斜着缠绕 2～3 圈，如图 1（b）所示。 ③将两根导线扳直，再各向两边绕 6 圈，多余的线头用钢丝钳剪掉，连接好的导线如图 1（c）所示。  图 1　单股铜芯导线的直线连接
单股铜芯导线的 T 字形分支连接	单股铜芯导线的 T 字形分支连接如图 2 所示，具体过程如下： ①将除去绝缘层和氧化层的支路芯线与主干芯线十字相交，然后将支路芯线在主干芯线上绕一圈并跨过支路芯线（即打结），再在主干线上缠绕 8 圈，如图 2（a）所示，多余的支路芯线剪掉。 ②对于截面积小的导线，也可以不打结，直接将支路芯线在主干芯线缠绕几圈，如图 2（b）所示。  图 2　单股铜芯导线的 T 字形分支连接
7 股铜芯导线的直线连接	7 股铜芯导线的直线连接如图 3 所示，具体过程如下： ①将去除绝缘层和氧化层的两根导线 7 股芯线散开，并将距绝缘层旁约 2/5 的芯线段绞紧，如图 3（a）所示。 ②将两根导线散开使芯线隔根对叉，如图 3（b）所示，然后压平两端对叉的线头，并将中间部分钳紧，如图 3（c）所示。 ③将一端的 7 股芯线按 2、2、3 分成三组，把第一组的 2 根芯线扳直（即与主芯线垂直），如图 3（d）所示，然后按顺时针方向在主芯线上紧绕 2 圈，再将余下的扳到主芯线上，如图 3（e）所示。 ④将第二组的 2 根芯线扳直，然后按顺时针方向在第一组芯线及主芯线上紧绕 2 圈，如图 3（f）所示。 ⑤将第三组的 3 根芯线扳直，然后按顺时针方向在第一、二组芯线及主芯线上紧绕 2 圈，如图 3（g）所示，三组芯线绕好后把多余的部分剪掉，已绕好一端的导线如图 3（h）所示。 ⑥按同样的方法缠绕另一端的芯线。

续表

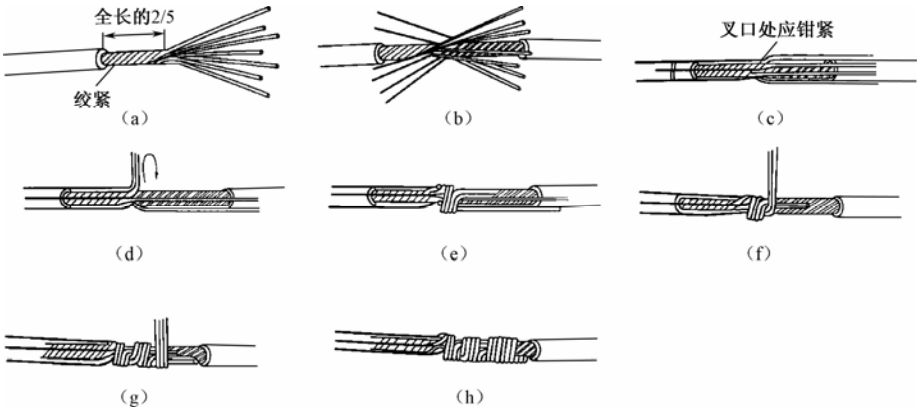
<table>
<tr><th>关键点</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td></td><td>

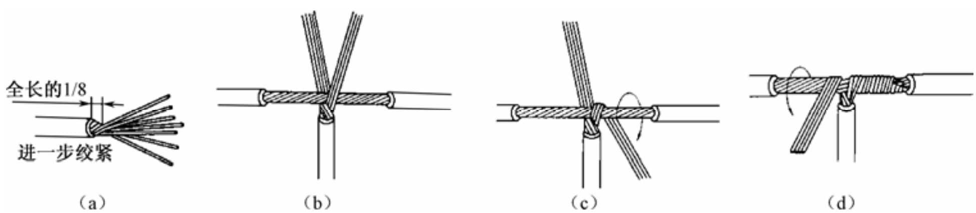
图 3　7 股铜芯导线的直线连接</td></tr>
<tr><td>7 股铜芯导线的 T 字形分支连接</td><td>7 股铜芯导线的 T 字形分支连接如图 4 所示，具体过程如下：
①将去除绝缘层和氧化层的分支线 7 股芯线散开，并将距绝缘层旁约 1/8 的芯线段绞紧，如图 4（a）所示。
②将分支线 7 股芯线按 3 股、4 股分成两组，并叉入主干线，如图 4（b）所示。
③将 3 股的一组芯线在主芯线上按顺时针方向紧绕 3 圈，再将余下的剪掉，如图 4（c）所示。
④将 4 股的一组芯线在主芯线上按顺时针方向紧绕 4 圈，再将余下的剪掉，如图 4（e）所示。


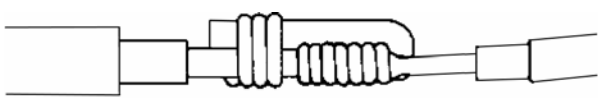
图 4　7 股铜芯导线的 T 字形分支连接</td></tr>
<tr><td>不同直径铜导线的连接</td><td>不同直径的铜导线连接如图 5 所示，具体过程是：将细导线的芯线在粗导线的芯线上绕 5～6 圈，然后将粗芯线弯折压在缠绕细芯线上，再把细芯线在弯折的粗芯线上绕 3～4 圈，多余的细芯线剪去。

图 5　不同直径铜导线的连接</td></tr>
<tr><td>多股软导线与单股硬导线的连接</td><td>多股软导线与单股硬导线的连接如图 6 所示，具体过程是：先将多股软导线拧紧成一股芯线，然后将拧紧的芯线在硬导线上缠绕 7～8 圈，再将硬导线折弯压紧缠绕的软芯线。

图 6　多股软导线与单股硬导线的连接</td></tr>
</table>

续表

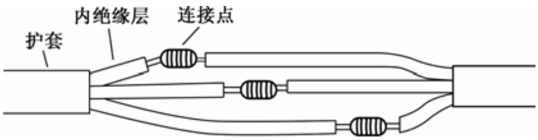
<table>
<tr><th>关键点</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td>多芯导线的连接</td><td>多芯导线的连接如图 7 所示，从图中可以看出，多芯导线之间的连接关键在于各芯线连接点应相互错开，这样可以防止芯线连接点之间短路。


图 7　多芯导线的连接</td></tr>
</table>

（2）铝芯导线之间的连接

铝芯导线由于采用铝材料作为芯线，而铝材料易氧化而在表面形成氧化铝，氧化铝的电阻率又比较高。如果线路安装要求比较高，**铝芯导线之间一般不采用铜芯导线之间的连接方法，而常用铝压接管（如图 6-4 所示）进行连接。**



图 6-4　铝压接管

用压接管连接铝芯导线的方法如图 6-5 所示，具体操作过程如下。

① 将待连接的两根铝芯线穿入压接管，并穿出一定的长度，如图 6-5（a）所示，芯线截面积越大，穿出越长。

② 用压接钳对压接管进行压接，如图 6-5（b）所示，铝芯线的截面积越大，要求压坑越多。

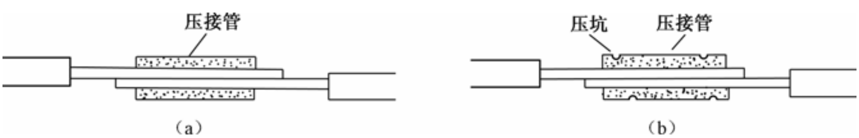


图 6-5　用压接管连接铝芯导线

如果需要将三根或四根铝芯线压接在一起，可按如图 6-6 所示的方法进行。

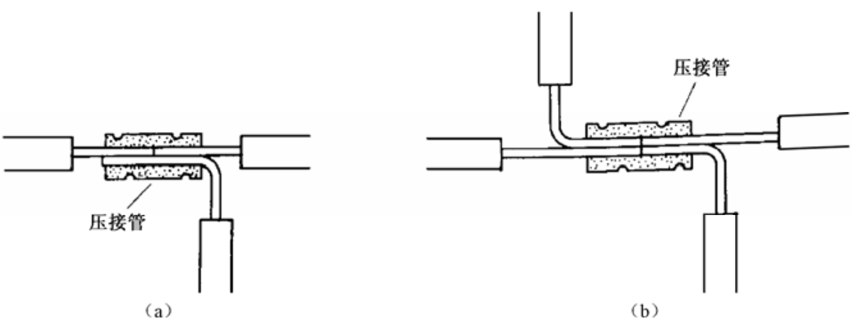


图 6-6　用压接管连接三根或四根铝芯线

（3）铝芯导线与铜芯导线的连接

当铝和铜接触时容易发生电化腐蚀，所以**铝芯导线和铜芯导线不能直接连接，连接时需要用到铜铝压接管**，这种套管是由铜和铝制作而成的，如图 6-7 所示。



图 6-7　铜铝压接管

铝芯导线与铜芯导线的连接方法如图 6-8 所示，具体操作过程如下：

① 将铝芯线从压接管的铝端穿入，芯线不要超过压接管的铜材料端，铜芯线从压接管的铜端穿入，芯线不要超过压接管的铝材料端。

② 用压接钳压挤压接管，将铜芯线与压接管的铜材料端压紧，铝芯线与压接管的铝材料端压紧。

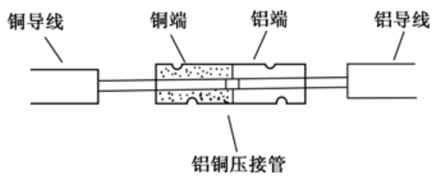


图 6-8　铝芯导线与铜芯导线的连接

3. 导线与接线柱之间的连接

（1）导线与针孔式接线柱的连接

导线与针孔式接线柱的连接方法如图 6-9 所示，具体操作过程是：旋松接线柱上的螺钉，再将芯线插入针孔式接线柱内，然后旋紧螺钉，如果芯线较细，可把它折成两股再插入接线柱。

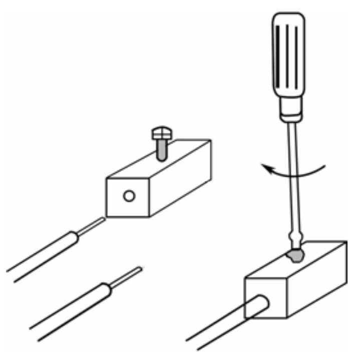


图 6-9　导线与针孔式接线柱的连接

（2）导线与螺钉平压式接线柱的连接

导线与螺钉平压式接线柱的连接如图 6-10 所示，具体操作过程是：将导线的芯线弯成圆环状，保证芯线处于平分圆环位置，然后将圆环套在螺钉上，再往螺母上旋紧螺钉，芯线就被紧压在螺钉和螺母之间了。

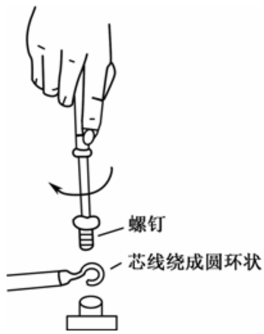


图 6-10　导线与螺钉平压式接线柱的连接

4．导线绝缘层的恢复

导线芯线连接好后，为了安全起见，需要在芯线上缠绕绝缘材料，即恢复导线的绝缘层。**缠绕的绝缘材料主要有黄蜡带、黑胶带和涤纶薄膜胶带。**

在导线上缠绕绝缘带的方法如图 6-11 所示，具体过程如下：

① 从导线的左端绝缘层约两倍胶带宽处开始缠绕黄蜡胶带，如图 6-11（a）所示，缠绕时，胶带保持与导线成 55°的角，并且缠绕时胶带要压住上圈胶带的 1/2，如图 6-11（b）所示，缠绕到导线右端绝缘层约 2 倍胶带宽处停止。

② 在导线右端用黑胶带与黄蜡胶带粘贴连接好，如图 6-11（c）所示，然后从右往左斜向缠绕黑胶带，缠绕方法与黄蜡胶带相同，如图 6-11（d）所示，缠绕至导线左端黄腊胶带的起始端结束。

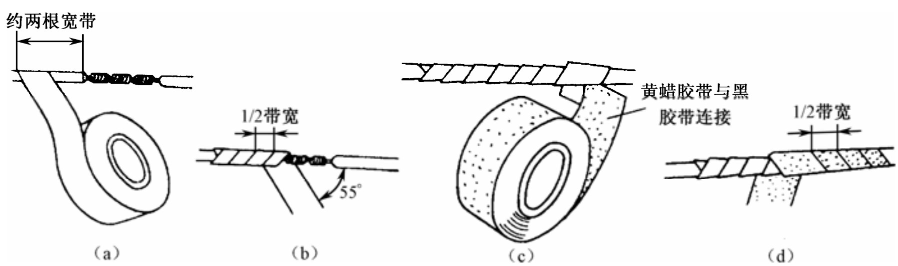


图 6-11　在导线上缠绕绝缘带

6.3 室内配电布线

在室内进行配电布线一般过程是：先根据室内情况和用户需要设计出配电方案，然后在室内进行布线（即安装导线），再安装开关和插座，最后安装配电箱。

6.3.1　配电方案的设计

1．了解整体楼房的配电结构

在设计用户室内配电方案前，有必要先了解一下用户所在楼房的整体配电结构，图 6-12

所示是一栋 2 单元 4 层楼的楼房配电结构简图。

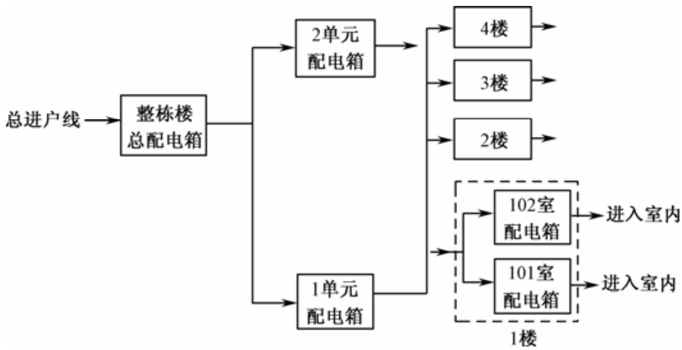


图 6-12　一栋 2 单元 4 层的楼房配电结构简图

从图中可以看出，总进户电源线先接到整栋楼的总配电箱，在配电箱中安装有开关、电度表和熔断器等，在该配电箱中可以对整栋楼房用电进行计费、控制和保护。总配电箱输出线再接到单元配电箱，单元配电箱输出线接至各楼层，如果每层楼用户很多，需要在每层楼再接楼层配电箱，若用户少，可将楼层的供电线直接到用户配电箱，用户配电箱输出端进入室内，在室内就可以进行布线（安装导线），以及安装开关、插座和灯具。

2．设计室内配电方案

在设计室内配电方案时，要充分考虑到安全，当出现电器短路、漏电和人体触电时，配电设备要能马上切断电源，执行保护。如图 6-13 所示是一种典型的配电方案。

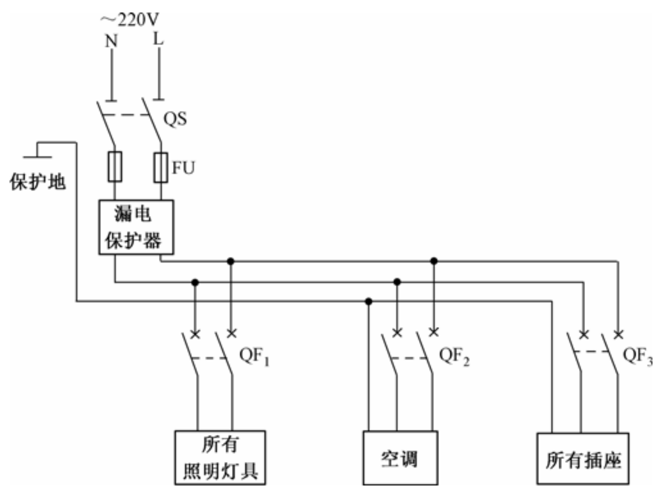


图 6-13　一种典型的配电方案

QS 为隔离开关，用来切断和接通整个室内的供电；FU 为熔断器，当室内线路发生严重短路时，它会被熔断，从而切断室内的供电；漏电保护器的作用是当室内线路发生对地漏电（如人体触电）时，它会自动断开内部触点，切断室内供电；QF_1～QF_3 为断路器，当照明灯具、空调或插座出现电流过大时，它们会自动切断开关，保护所接的电器，例如某个插座所接的电

器出现短路时，通过 QF_3 的电流很大，QF_3 自动跳闸（即自动切断开关），保护短路的电器，若短路故障排除，合上 QF_3 开关就可恢复各个插座的供电。为了安全起见，还可以再给空调和插座安一根地线，地线的另一端可与埋入大地的金属体相连。

6.3.2 布线

布线是指在室内安装导线。在布线前，要根据用户要求和室内情况确定布线方案，即规划导线的走向，确定配电箱、开关和插座的安装位置等。布线方案确定后，可用粉笔在墙壁上画出导线的走向、开关和插座的安装位置，如图 6-14 所示，在开关和插座安装位置打“×”表示，如果担心混淆，可用“○”表示开关，用“△”表示插座。

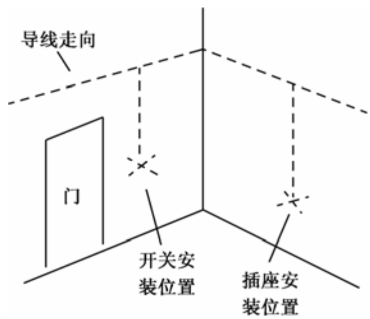


图 6-14 在墙壁上画布线标志

布线方案规划好后，就可以开始按方案安装布线。**在布线时要注意以下原则：**

① 选用的导线应在电气性能（如安全电流）和机械强度方面满足要求。

② 布线时应尽量使用长导线布线，不要用短导线拼接成长导线进行布线。如果用短导线拼接成长导线，必然会产生很多接线点，接线点是导线中的薄弱环节，易出现接线电阻增大和绝缘性能下降的现象，若一定要进行导线连接，可把连接点设在插座、接线盒和灯座中。

③ 布线要结实牢固，并兼顾美观。

布线有明线布线、槽板布线和套管布线 3 种形式。将导线沿着墙壁、天花板和梁柱等表面进行安装称为明线布线；将导线放在绝缘槽板中沿着墙壁和天花板进行安装称为槽板布线；将导线穿在导管中沿着墙壁、天花板和地板进行安装称为套管布线。

1．明线布线

在明线布线时，可以采用多根单芯绝缘导线进行布线，也可采用具有护套的多股绝缘导线进行布线。

（1）多根单芯绝缘导线的安装

若采用多根单芯绝缘导线进行室内布线时，对于铜芯导线，其截面积不能小于 1mm²，对于铝芯导线，其截面积不能小于 1.5mm²。在布线时，多根单芯绝缘导线一般使用瓷夹板来固定位置，瓷夹板如图 6-15 所示。

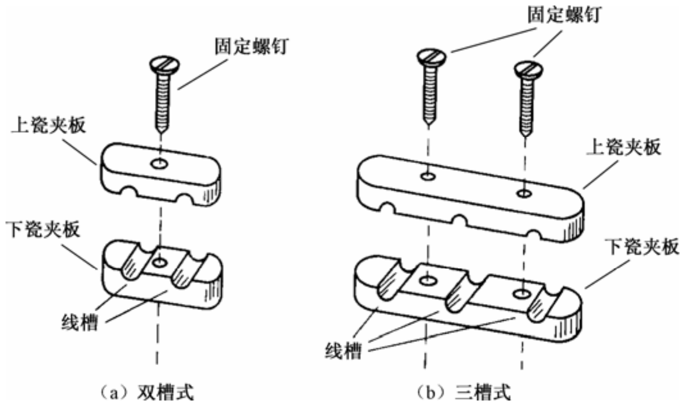


图 6-15　瓷夹板

在使用瓷夹板安装导线时，若墙壁是木质结构的，可以用螺钉将瓷夹板固定下来，若是墙砖或水泥结构的，通常需要先在墙壁上安装木塞，再将瓷夹板固定在木塞上。若墙壁是墙砖结构，一般安装矩形木塞，若是水泥结构，则安装八角形木塞，这两种木塞如图 6-16 所示。

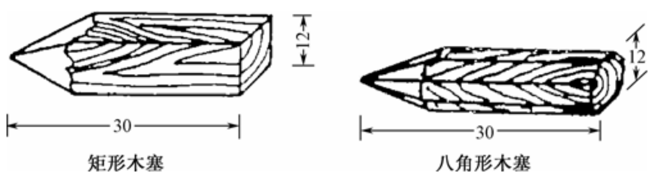


图 6-16　两种木塞

木塞的安装如图 6-17 所示，具体说明如下：

① 用材质松的杉木削制出图 6- 16 所示的木塞。

② 用电锤或手电钻在墙壁上钻出一个直径为 10cm（较木塞直径小）、深度较木塞长的小孔。

③ 再用锤子将木塞锤入小孔内。

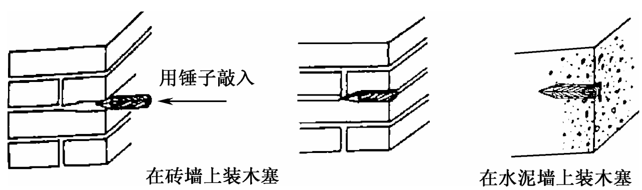


图 6-17　木塞的安装

在使用瓷夹板安装导线时，要注意以下几个要点：

① 沿导线的走向每隔 80cm 安装一个瓷夹板，将导线压在线槽内，如图 6-18（a）所示。

② 遇到导线拐弯时，应在拐弯处各安装一个瓷夹板，瓷夹板到拐弯处的距离为 5～10cm，如图 6-18（b）所示。

③ 当有三根导线同行时，可使用三槽式瓷夹板，也可以使用双槽式瓷夹板，如图 6-18（c）所示。

④ 当导线出现交叉时，应在交叉处安装 4 个瓷夹板，如图 6-18（d）所示。

⑤ 在导线进入插座前，要在距插座较近处安装一个瓷板夹，如图 6-18（e）所示。

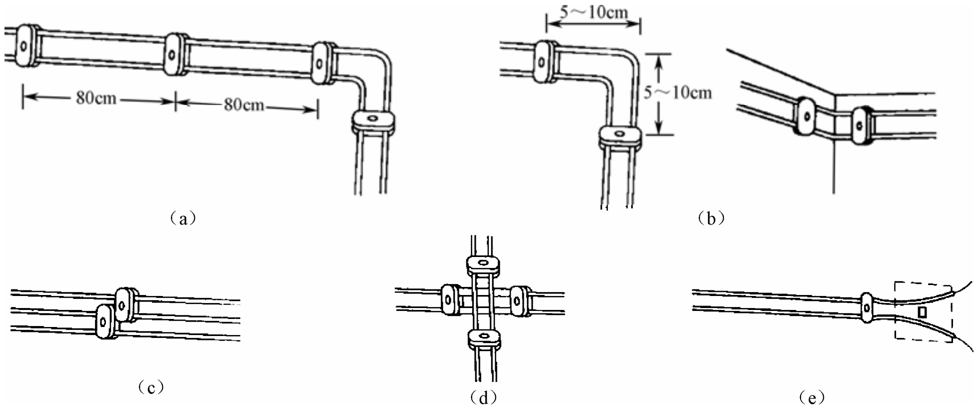


图 6-18　用瓷夹板安装导线

（2）护套线的安装

采用护套线进行室内布线时，对于铜芯导线，其截面积不能小于 1.5mm²，对于铝芯导线，其截面积不能小于 2.5mm²。在布线时，固定护套线一般用线夹卡，常见线夹卡有铝片卡、单钉塑料线夹和双钉塑料线夹，如图 6-19 所示。使用这些线夹卡安装护套件，除了固定方式不同外，安装要点基本相同，这里以铝片卡为例来说明护套线的安装。

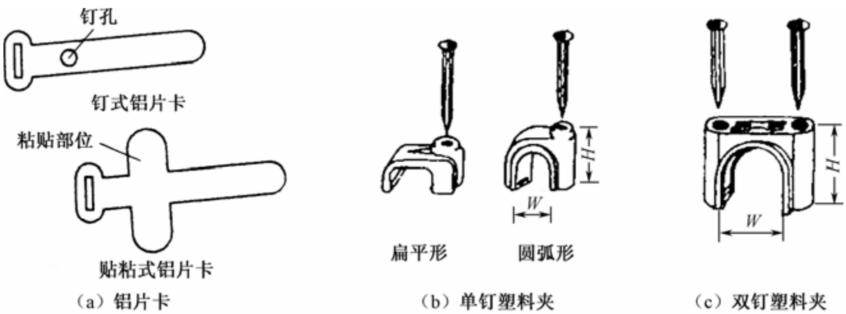


图 6-19　护套线安装常用线夹卡

铝片卡又称钢精扎头，它有钉式和粘贴式两种，前者是用铁钉进行固定的，后者是用黏合剂固定的。

在安装护套线时，先用铁钉或黏合剂将铝片卡固定在墙壁上，如图 6-20 所示，在钉铝片卡时要注意铝片卡之间距离一般为 200～250mm，铝片卡与接线盒、开关的距离要近一些，约 50mm。铝片卡安装好后，将护套线放铝片卡上，再按图 6-21 所示方法将护套线固定下来。

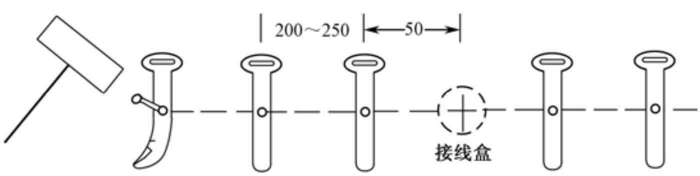


图 6-20　安装铝片卡

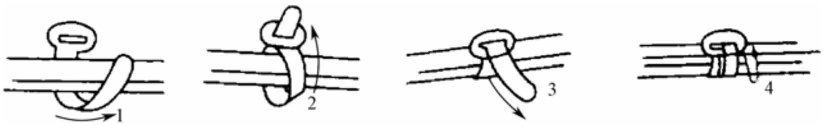


图 6-21　用铝片卡固定护套线

在使用铝片卡固定护套线时的一些要点与瓷夹板基本相同，如图 6-22 所示是用铝片卡固定的室内配电线路。该线路包含以下几个要点：

① 护套线与天花板的距离为 50mm。

② 铝片卡之间的正常距离为 200～250mm，铝片卡与开关、吸顶灯和拐角的距离要短一些，约 50mm。

③ 在导线分支、交叉处要安装铝片卡。

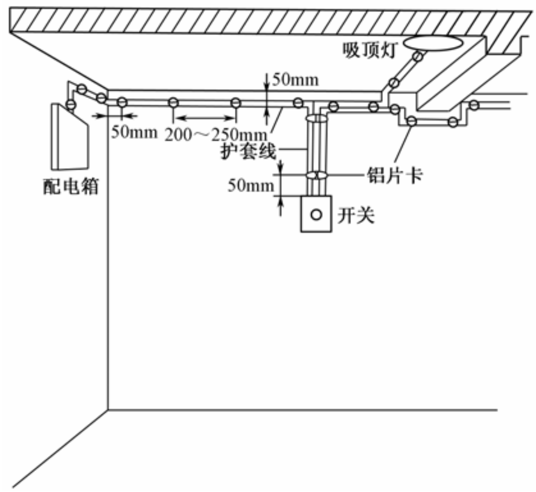


图 6-22　用铝片卡固定的室内配电线路

2．槽板布线

槽板布线是一种较常用的住宅配电布线方式，它是将绝缘导线放在绝缘槽板（塑料或木质）内进行布线，由于导线有槽板的保护，因此绝缘性能和安全性比明线布线好。槽板结构如图 6-23 所示。在用槽板进行布线时，先用钢钉将槽板固定在墙面上，然后将导线放在槽板中，然后钉上或粘上盖板。

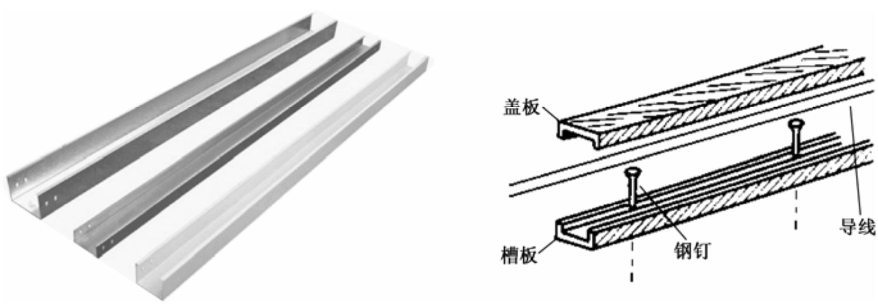


图 6-23　布线用的槽板

在使用槽板布线时，要注意以下几个要点：

① 在安装槽板时，内部钢钉之间相隔距离不要大于 50cm，对于拐角拼接处和与接线盒连接处，钢钉距离要靠近，如图 6- 24（a）所示。

② 在槽板 90°转向时，应将两槽板切割成 45°进行拼接，如图 6-24（b）所示。

③ 在槽板 T 字形拼接时，可在主干槽板旁边切出一个凹三角形口，分支槽板切成凸三角形，再将分支槽板按图 6-24（c）所示的方法将分支槽板三角形凸头插入主干槽板凹三角形口中。

④ 在槽板与接线盒（如插座、开关等）对接时，应紧密无缝隙地连接在一起，如图 6-24（d）所示。

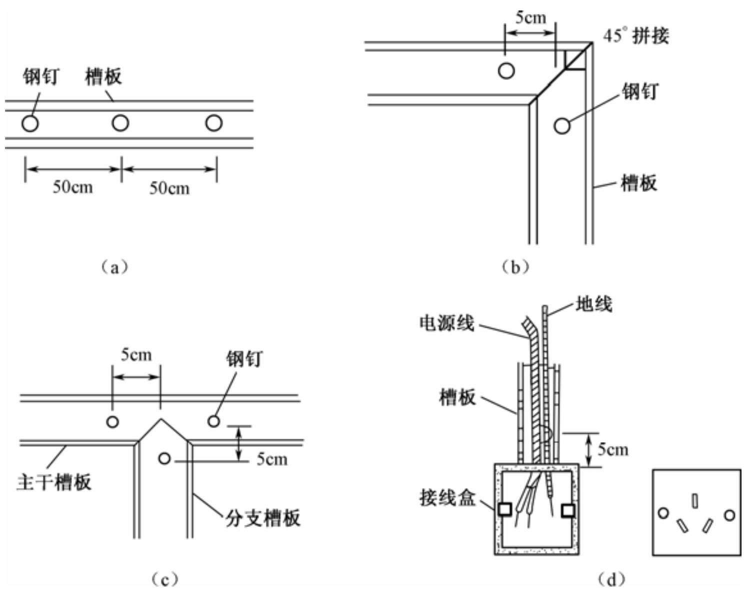


图 6-24 槽板布线要点

3．套管布线

套管布线是指将导线放入绝缘套管中进行布线。这种布线比较安全可靠，能有效地防止腐蚀气体的侵蚀和机械损伤，但这种布线费用较高。套管布线以前多用在厂房和一些重要的公共建筑物内，以及易爆易燃和较潮湿的场所，现在很多民用建筑也开始采用套管布线。

套管布线采用的套管主要有钢管和塑料管两种。

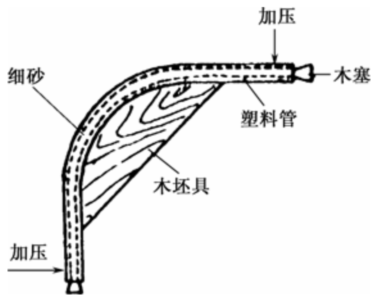
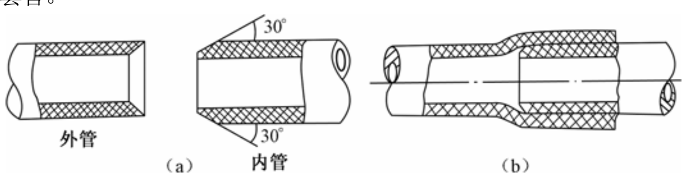
钢管有镀锌钢管和不镀锌钢管之分。管壁较厚的钢管（壁厚 3mm 以上）一般用在有腐蚀气体和潮湿场所进行明敷和暗敷（又称埋敷），管壁薄的钢管（壁厚 1.5mm 以下）又称电线管，常用在干燥场所进行明敷和暗敷。在用钢管布线时要将钢管的外壁可靠接地，以免内部导线绝缘不良而引起触电事故。

塑料管可分为硬塑料管和半硬塑料管。硬塑料管的耐腐蚀性好，但机械强度和耐温性不如钢管，它一般用在腐蚀性大的场所，半硬塑料管耐温和机械强度较差，一般用在民用建筑场所室内布线。

由于**室内布线常采用塑料管布线，很少用到钢管布线，**所以这里只介绍塑料管布线方法。

塑料管布线的过程，简单来说，就是先将塑料管按要求连接好，然后将塑料管安装在墙壁表面（明敷）或埋设在墙壁内（暗敷），再穿入导线。塑料套管的布线要点说明见表 6-9。

表 6-9　塑料套管的布线要点说明

要点	说　　明
锯管落料	在锯管前应先检查套管是否有裂缝、凹陷，以及管口是否有锋口，再根据套管弯曲转角情况决定几根套管接成一个线段，并确定套管弯曲部位，最后按要求长度锯管。
弯管	在改变方向时需要将套管进行弯曲处理，为了后面的穿线方便，应尽量减少弯头数量，弯管时弯折应平缓，以免折断套管。 塑料套管可采用如图 1 所示的弯曲方法，具体操作过程是：先向套管中充满细砂，两端用木塞堵住，然后用喷灯或电炉加热弯曲处，再将套管放在木坯具上弯折成形，等冷却后倒出沙子。注意套管充入的沙子要干燥，以免加热时沙子水分蒸发形成高压而导致管子爆裂或木塞沙子喷出伤人。  图 1　一种塑料套管弯曲方法
锯管	当需要切断套管时，可按要求的长度用钢锯或锯割机将套管锯断，在锯割时，要求锯口平整，套管锯断后用锉刀将锯口上的毛刺锉平。
套管的连接	在用套管布线时，可能会遇到套管长度不够的情况，将套管连接起来就可以解决这个问题。套管连接常用的方法有加热连接法和加装套管连接法。 ①加热连接法 加热连接法如图 2 所示，具体操作过程是：先将要连接的一根套管（称做外管）端口的内壁按图示方法刮掉一部分，将另一根套管（称做内管）端口外壁按图示形状削掉一部分，并用汽油或酒精清洗连接部位，再用电炉或喷灯加热外管连接部位呈柔软状后，迅速将内管插入外管中，然后用湿布冷却套管，使套管连接部位恢复到原来的硬度。 ②加装套管连接法 加装套管连接法如图 3 所示，具体操作过程是：从直径相同的套管上锯下一段套管，该套管长度为直径的 2.5～3 倍，然后使用加热的方法将套管胀大，并迅速将需要连接的两根套管插入其中，再用湿布冷却套管。  图 2　加热法连接套管

续表

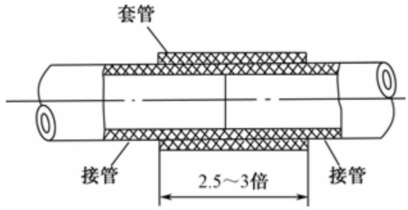
<table>
<tr><th>要点</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td></td><td>


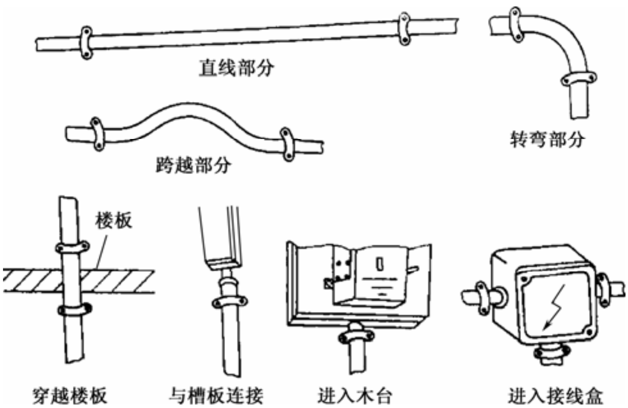
图 3　加装套管连接套管
</td></tr>
<tr><td>套管的固定</td><td>
在安装套管时，为了整齐美观，要求套管应沿建筑物水平或垂直安装，并采用管卡和支架固定。图 4 列出了一些常见情况下的安装固定方式。从图中可以看出，在套管直线安装时管卡的距离可以远些（1～3.5m），而在转弯、跨越和穿越情况下及与槽板、木台、接线盒连接时，管卡要安装的近一些（100～300mm）。


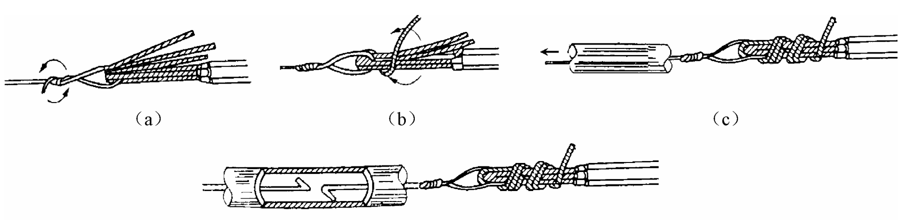
图 4　套管的固定
</td></tr>
<tr><td>套管穿线</td><td>
套管安装完成后，就可以开始往管内穿入导线。在套管穿线时，可根据实际情况采用不同的方法。常见套管穿线方式有：
①若套管较短，并且穿入的导线较硬时，可直接将导线从套管的一端穿入，从另一端穿出。
②若套管较长，并且穿入的导线较软时，可借助铁丝来穿线。具体做法是将导线绑在铁丝上，如图 5（a）、（b）所示，再将铁丝从套管中穿过，导线也随之穿过了套管，如图 5（c）所示。
③若用单根铁丝穿管困难时，可使用双铁丝穿线。具体做法是将两根铁丝头部弯折成钩状，再在一根铁丝上绑上导线，然后将两根铁丝分别从套管两端穿入，如图 5（d）所示，并设法让两根铁丝钩头勾接上，然后将未绑导线的铁丝从套管拉出，导线即可随之穿过套管。


图 5　套管的穿线
</td></tr>
</table>

4．导线连接点的处理

在室内布线时，除了要安装主干线外，还要安装分支线，分支线与主干线连接时就会产生连接点。**导线连接点是电气线路的薄弱环节，容易出现氧化、漏电和接触不良等故障，如果采用槽板、套管和暗敷布线时，由于无法看见导线，故连接点出现故障很难查找出来。**

正确处理导线连接点可以提高电气线路的稳定性，并且在出现故障后易于检查。**处理导线连接点常用的方法是将连接点放在插座和接线盒内。**

（1）将导线接线点放在插座内

要安装一个插座，如果按如图 6-25（a）所示的做法在主干线上接分支线，再将插座接在分支线上，就会产生两个接线点。正常的做法是按如图 6-25（b）所示的方法，将主干线引入插座，并将连接点安装在插座的接线端上，然后主干线仍引出插座。

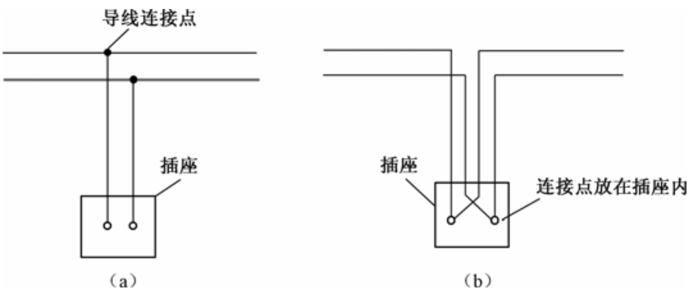


图 6-25　将导线连接点安置在插座中

（2）将导线连接点放在接线盒中

如果导线分支处没有插座，也可以在分支处专门安装一个接线盒。如图 6-26（a）所示是没有使用接线盒的导线连接，它有两个连接点，采用接线盒后，可以将分支连接点安装在接线盒的两个接线端上，如图 6-26（b）、（c）所示。

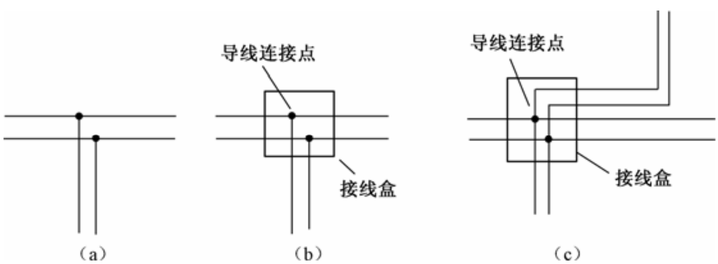


图 6-26　将导线连接点安置在接线盒中

导线连接点除了可以放在插座和接线盒中，还可以放在开关和灯具的灯座中。由于室内配电导线故障大多数发生在导线连接点，当配电线路出现故障后，可先检查插座、接线盒内的导线连接点，从而很快找出故障点。

6.3.3　插座和开关的安装

布线完成后，接着就是在导线相应的位置上安装开关和插座。

1．插座的安装

（1）插座安装注意事项

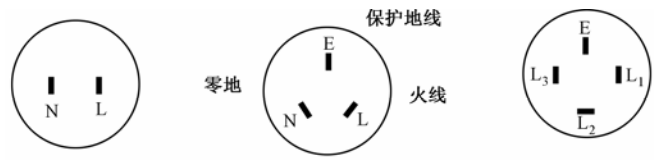
在安装插座时，要注意以下事项：

① 在选择插座时，要注意插座的电压和电流规格，住宅用插座电压通常规格为 220V，电流等级有 10A、15A、20A 和 30A，插座所接的负载功率越大，要求插座电流等级越大。

② 根据室内用电器及室内情况，确定插座的种类、数量和安装位置。

③ 在潮湿的环境（如厨房），插座的安装高度不低于 1.5m；在儿童活动场所，插座位置不低于 1.8m。

④ 插座接线极性应正确，常见的插座接线极性规律如图 6-27 所示。单相 2 孔式插座的左极接 N 线（零线），右极接 L 线（火线）；单相 3 孔式插座的左极接 N 线，右极接 L 线，中间极接 E 线（保护地线）；三相 4 孔式插座的左极接 L_3 线（火线 3），右极接 L_1 线（火线 1），上极接 E 线，下极接 L_2 线（火线 2）。



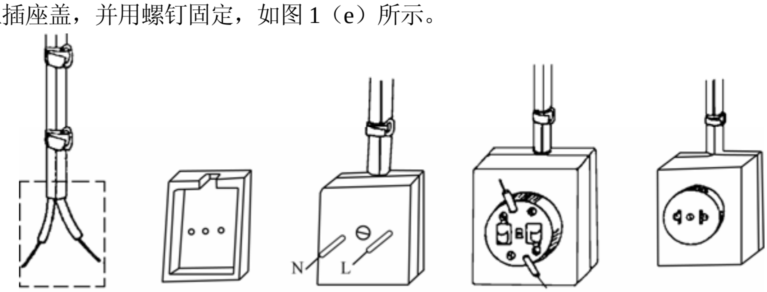
（a）单相2孔插座　（b）单相3孔插座　（c）三相4孔插座

图 6-27　常见的插座接线极性规律

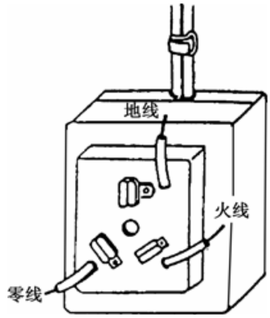
（2）明装插座的安装

明装插座是指安装在墙壁表面的插座。明装插座有 2 孔明装插座和 3 孔明装插座。明装插座安装说明见表 6-10。

表 6-10　明装插座安装说明

关键点	说　明
2 孔明装插座的安装	2 孔明装插座的安装过程如下： ①将导线剥去绝缘层，并用线卡固定在墙壁上，如图 1（a）所示。 ②在插座的固定木台上钻三个孔，并在边沿开一个小槽，如图 1（b）所示。 ③将导线从木台的小槽中穿入木台，并将两芯线从旁边的两孔中穿出，再将木台翻过来安装在墙壁上，用螺钉穿过木台中间的小孔将木台固定在墙上，如图 1（c）所示。 ④将插座安装在木台上，并将两根导线的芯线与插座接线端连接好，连接时要注意火线与右插孔相连，零线与左插孔相连，如图 1（d）所示。 ⑤压上插座盖，并用螺钉固定，如图 1（e）所示。  （a）（b）（c）（d）（e） 图 1　2 孔明装插座的安装

续表

关键点	说　　明
3 孔明装插座的安装	3 孔明装插座的安装过程与 2 孔插座基本相同，不同之处在于 3 孔明装插座可以连接三根导线：火线（L）、零线（N）和保护地线。3 孔明装插座的安装如图 2 所示，安装时要注意插座左孔连接零线，右孔连火线，上孔连保护地线，如果只有两根导线进入插座，上孔可悬空不用。  图 2　3 孔明装插座的安装

（3）暗装插座的安装

暗装插座是指安装在墙壁内部的插座。当室内采用暗线布线（即将导线穿在套管中并埋在墙壁内）时，一般要安装暗装插座。暗装插座结构如图 6-28 所示。

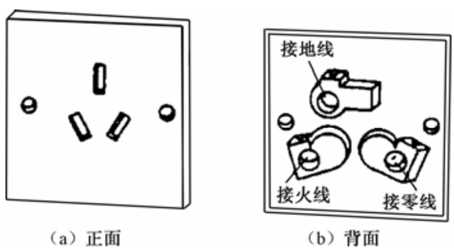


图 6-28　暗装插座结构

暗装插座安装如图 6-29 所示，具体过程说明如下：

1）在墙内已埋设导线的位置凿出一个大小与暗盒相同的孔。

2）在凿孔中安装暗盒，并从套管中拉出导线放入暗盒中。

3）将剥去绝缘层的导线分别与暗装开关的三个插孔接线端连接，连接时要按“左零右火中间地”的规律（正对插座时）。

4）用螺钉将暗装开关固定在暗盒上。

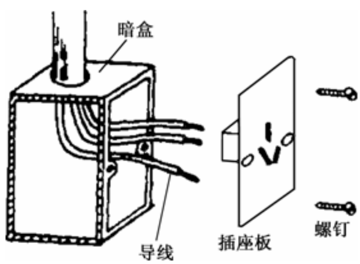


图 6-29　暗装插座安装

2．开关的安装

（1）开关的种类与选择

开关的种类很多，常见的照明开关如图 6-30 所示。除了这些开关外，还有一些特殊功能的开关，如触摸开关、延时开关和声控开关等。

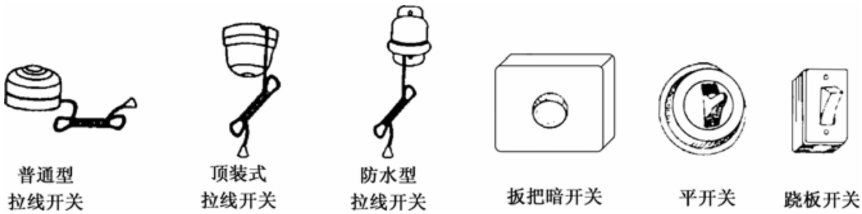


图 6-30　常见的照明开关

在选择开关时，要注意电压和电流规格，住宅照明通常选用电压为 220V，电流在 2.5～10A 的开关。若开关接大功率负载，应先计算出负载的电流，选用开关的额定电流约是负载电流的 2 倍；若负载电流很大，也可使用断路器或闸刀开关。

（2）开关安装注意事项

开关在安装时要注意以下事项：

① 开关的安装高度要方便使用。接线开关的安装高度一般为 2.2～3m，扳把式和跷板式开关高度一般为 1.4m，并排安装的开关高度应该一致。

② 单极开关（即只接一根线的开关）要接火线，以保证开关断开后用电器不带电。

③ 潮湿、多尘和多油烟的地方尽量不要安装开关，若需要安装开关，最好选用防水型开关。

④ 明装开关应装在木台上，暗装开关的盖板应安装严密，并与墙壁相平。

6.3.4　配电箱的安装

安装配电箱是室内配电的一个重要内容。**配电箱的功能有：① 将室内线路与室外供电线路连接起来；② 能对室内供电进行通断控制；③ 记录室内用电量；④ 当室内线路出现过载或漏电时，能执行保护控制。**

（1）安装进户线

在安装配电箱前，需要安装进户线将室外的线路引入室内。进户线的安装如图 6-31 所示。

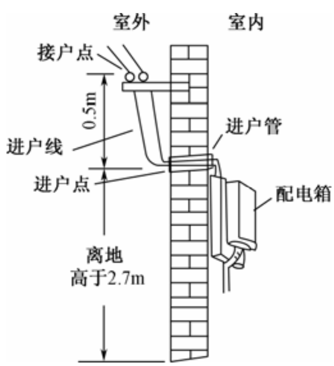


图 6-31　进户线的安装

在安装进户线时，先在墙壁上安装一根横杆支架，再在支架上安装几个绝缘子，让绝缘子来固定进户线，在横杆支架下方约 0.5m 处安装一个进户管，进户管距地面一般高于 2.7m，然后将进户线从进户管穿入室内，进入配电箱。

（2）制作配电箱

在将配电箱安装在墙壁前，需要先制作配电箱，即在配电箱中安装电度表、闸刀开关、漏电保护器和熔断器（或断路器）。配电箱的制作方案很多，如图 6-32 所示是两种较常见的方案。

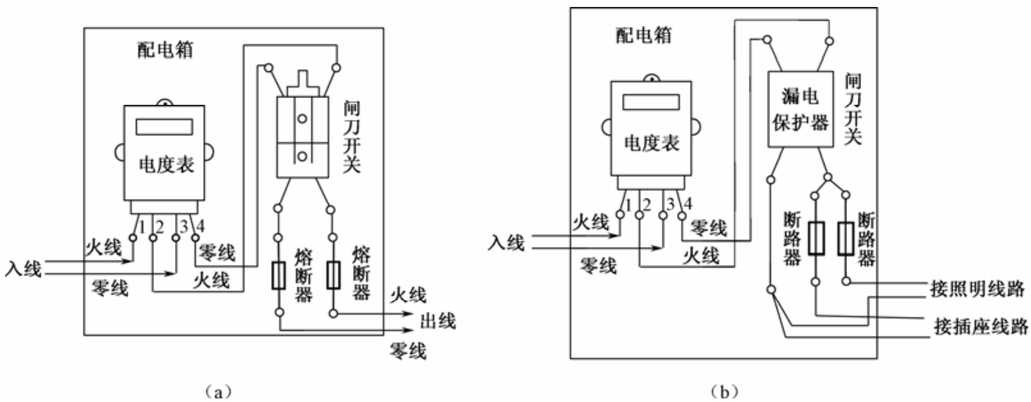


图 6-32　两种常见的配电箱制作方案

图 6-32（a）所示的配电箱安装了电度表、闸刀开关和熔断器。电度表用来记录输入的电量；闸刀开关可以接通和切断电源；熔断器在负载出现过流时熔断进行保护。这种配电箱的优点是成本低，缺点是没有漏电保护，当人体发生触电时不能切断电源，另外当熔断器开路后，需要更换新的熔断器。

如图 6-32（b）所示的配电箱安装了电度表、漏电保护器和断路器。当室内线路出现漏电或人体与地之间发生触电时，漏电保护器自动切断电源；当室内线路中的某电器出现过流时，相应的断路器会自动跳闸，切断该路电源来保护用电器。这种配电箱具有漏电保护功能，并且负载过流引起熔断器跳闸后，只要排除过流故障后，再重合上断路器开关即可重新接通电源，由于这种配电箱控制保护功能比较完善，所以经济条件允许，室内配电尽量采用这种方案。

为了方便集中管理，有些配电箱内不安装电度表，而将电度表集中起来安装，再将电度表的输出线接到室内配电箱。如图 6-33 所示列出了一些实际的配电箱。

（3）配电箱的安装

配电箱有两种安装方式：明装方式和暗装方式。明装方式是指将配电箱直接安装在墙壁上；暗装方式是将配电箱嵌入墙内安装。配电箱的两种安装方式如图 6-34 所示。

配电箱在安装时主要注意以下事项：

① 配电箱应垂直安装。在暗装时，配电箱应紧贴墙内壁，箱门能够充分打开。

② 配电箱明装时，箱底高度距地面约 1.8m，暗装时距地面约 1.4m。

③ 引出配电箱外的导线应套绝缘管。



图 6-33　一些实际的配电箱

如果没有配电箱，也可以将电度表、闸刀开关和熔断器等安装在一块木板上（称做配电板），然后将配电板固定在墙上，由于没有配电箱的保护，配电板一定要安装在比较高、人体不易接触到的位置。

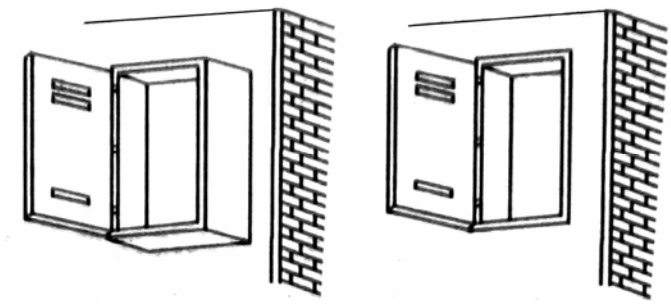
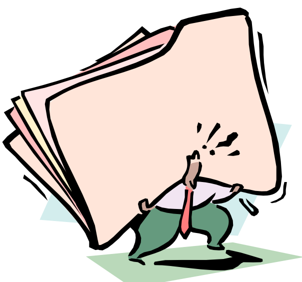


图 6-34　配电箱的两种安装方式

第7章

安 全 用 电



问：老师，了解安全用电有什么好处？

答：在进行电工作业时，由于所接触的电压电流都比较大，为了避免操作时出现触电而造成人体伤害，需要掌握一些安全用电方面的知识。



7.1 人体触电的几种方式

7.1.1 电流对人体的伤害

1．人体对不同电流呈现的症状

当人体不小心接触带电体时，就会有电流流过人体，这就是触电。人体在触电时表现出来的症状与流过人体的电流有关，表7-1列出了人体通过大小不同的交、直流电流时所表现出来的症状。

表7-1 人体通过大小不同的交直流电流时的症状

电流/mA	人体表现出来的症状	
	交流（50～60Hz）	直 流
0.6～1.5	开始有感觉——手轻微颤抖	没有感觉
2～3	手指强烈颤抖	没有感觉
5～7	手部痉挛	感觉痒和热
8～10	手已难于摆脱带电体，但还能摆脱；手指尖部到手腕剧烈疼痛	热感觉增加
20～25	手迅速麻痹，不能摆脱带电体；剧痛，呼吸困难	热感觉大大加强，手部肌肉收缩
50～80	呼吸麻痹，心室开始颤动	强烈的热感受，手部肌肉收缩，痉挛，呼吸困难
90～100	呼吸麻痹，延续3s或更长时间，则心脏麻痹，心室颤动	呼吸麻痹

从表中可以看出，**流过人体的电流越大，人体表现出来的症状越强烈，电流对人体的伤害越大；另外对于相同大小的交流和直流来说，交流对人体伤害更大一些。**

一般规定，**10mA以下的工频（50Hz或60Hz）交流电流或50mA以下的直流电流对人体是安全的，故将该范围内的电流称做安全电流。**

2．与触电伤害程度有关的因素

有电流通过人体是触电对人体伤害的最根本原因，流过人体的电流越大，人体受到的伤害越严重。**触电对人体伤害程度的具体因素主要有：**

① **人体电阻的大小。**人体是一种有一定阻值的导电体，其电阻大小是不固定的，当人体皮肤干燥时阻值较大，约10～100kΩ；当皮肤出汗或破损时阻值较小，约800～1000Ω；另外，当接触带电体的面积大、接触紧密时，人体电阻也会减小。在接触大小相同的电压时，人体电阻越小，流过人体的电流就越大，触电对人体的伤害就严重。

② **触电电压的大小。**当人体触电时，接触的电压越高，流过人体的电流就越大，对人体

伤害就更严重。一般规定，在正常的环境下安全电压为 36V，在潮湿场所的安全电压为 24V 和 12V。

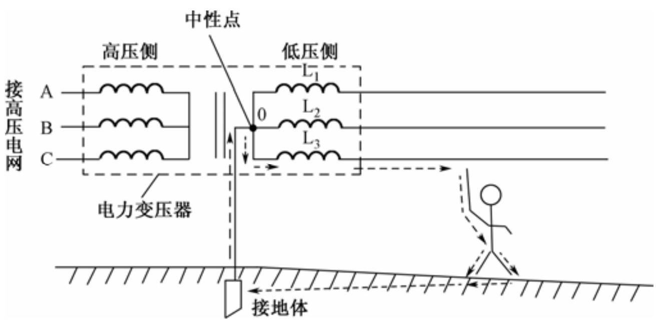
③ **触电的时间。**如果触电后长时间未能脱离带电体，电流长时间流过人体会造成严重的伤害。

此外，即使相同大小的电流，流过人体的部位不同，对人体造成的伤害也不同。电流流过心脏和大脑时，对人体危害最大，所以双手之间、头足之间和手脚之间的触电更为危险。

7.1.2　触电的几种方式

人体触电的方式主要有：单相触电、两相触电和跨步触电。人体触电方式说明见表 7-2。

表 7-2　人体触电方式说明

触电方式	说　明
单相触电	**单相触电是指人体只接触一根相线时发生的触电。**单相触电又分为电源中性点接地触电和电源中性点不接地触电。 （1）电源中性点接地触电 电源中性点接地触电方式如图 1 所示。**电源中性点接地触电是在电力变压器低压侧中性点接地的情况下发生的。**  图 1　电源中性点接地触电方式 电力变压器的低压侧有 3 个绕组，它们的一端接在一起并且与大地相连，这个连接点称为中性点。每个绕组上有 220V 电压，每个绕组在中性点另一端接出一根相线，每根相线与地面之间有 220V 的电压，当站在地面上的人体接触某一根相线时，就有电流流过人体。电流的途径是：变压器低压侧 L_3 相绕组的一端→相线→人体→大地→接地体→变压器中性点→L_3 绕组的另一端，如图中虚线所示。 该触电方式的对人体的伤害程度与人体与地面的接触电阻有关，若赤脚站在地面上，人与地面的接触电阻小，流过人体的电流大，触电伤害大，穿着胶底鞋则伤害轻。 （2）电源中性点不接地触电 电源中性点不接地触电方式如图 2 所示。**电源中性点不接地触电是在电力变压器低压侧中性点不接地的情况下发生的。**

续表

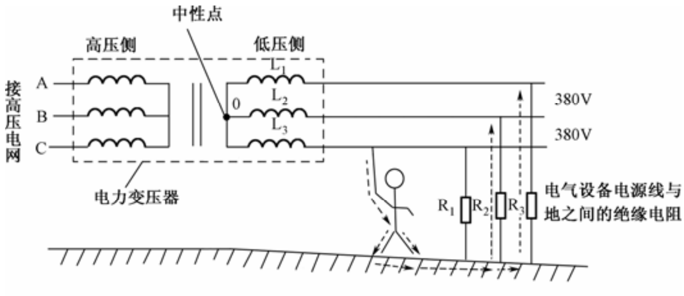
<table>
<tr><th>触电方式</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td></td><td>


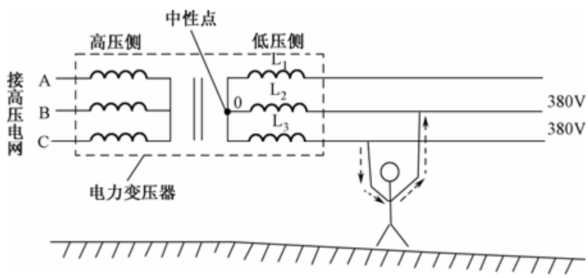
图 2　电源中性点不接地触电方式
电力变压器低压侧的 3 个绕组中性点未接地，任意两根相线之间有 380V 的电压（该电压是由两个绕组上的电压串联叠加而得到的），当站在地面上的人体接触某一根相线时，就有电流流过人体，电流的途径是：L_3 相线→人体→大地，再分作两路，一路经电气设备与地之间的绝缘电阻 R_2 流到 L_2 相线，另一路经 R_3 流到 L_1 相线。
该触电方式对人体的伤害程度除了与人体与地面的接触电阻有关外，还与电气设备电源线与地之间的绝缘电阻有关，若电气设备绝缘性能良好，一般不会发生短路，若电气设备严重漏电或某相线与地短路，加在人体上的电压将达到 380V，会导致严重的触电事故。
</td></tr>
<tr><td>两相触电</td><td>
两相触电是指人体同时接触两根相线时发生的触电。两相触电如图 3 所示。


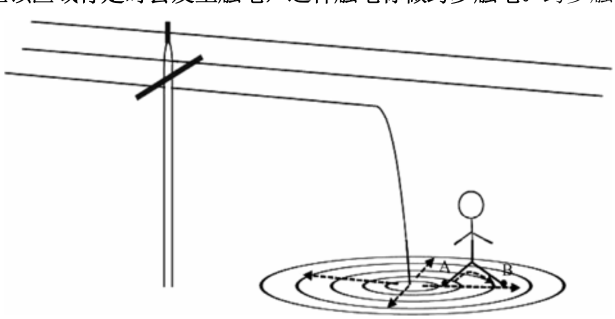
图 3　两相触电
当人体同时接触两根相线时，由于两根相线之间有 380V 的电压，有电流流过人体，电流途径：一根相线→人体→另一根相线，由于加到人体的电压有 380V，故流过人体的电流很大，在这种情况下，即使触电者穿着绝缘鞋或站在绝缘台上，也起不了保护作用，因此两相触电对人体是很危险的。
</td></tr>
<tr><td>跨步触电</td><td>
当电线或电气设备与地发生漏电或短路时，有电流向大地泄漏扩散，在电流泄漏点周围会产生电压降，当人体在该区域行走时会发生触电，这种触电称做跨步触电。跨步触电如图 4 所示。


图 4　跨步触电
</td></tr>
</table>

续表

触电方式	说　　明
	图中的一根相线掉到地面上，导线上的电压直接加到地面，以导线落地点为中心，导线上的电流向大地四周扩散，同时随着远离导线落地点，地面的电压也逐渐下降，距离落地点越远，电压越低。当人在导线落地点周围行走时，由于两只脚着地点与导线落地点的距离不同，这两点电压也不同，图中 A 点与 B 点的电压不同，它们存在着电压差，比如 A 点电压为 110V，B 点电压为 60V，那么两只脚之间的电压差为 50V，该电压使电流流过两只脚，从而导致人体触电。 一般地，在低压电路中，在距离电流泄漏点 1m 范围内，电压约有 60%的降低，在 2～10m 范围内，约有 24%的降低，在 11～20m 范围内，约有 8%的降低，在 20m 以外电压就很低，通常不会发生跨步触电。 根据跨步触电原理可知，只要两只脚的距离小才能让两只脚之间的电压小，才能减轻跨步触电的危害，所以当不小心进入跨步触电区域时，不要急于迈大步跑出来，而是迈小步或单足跳出。

7.2 接地与接零

电气设备在使用过程中，可能会出现绝缘层损坏、老化或导线短路等现象，这样会使电气设备的外壳带电，如果人不小心接触外壳就会发生触电事故，解决这个问题的方法就是将电气设备的外壳接地或接零。

7.2.1　接地

接地是指将电气设备的金属外壳或金属支架直接与大地连接。接地如图 7- 1 所示。

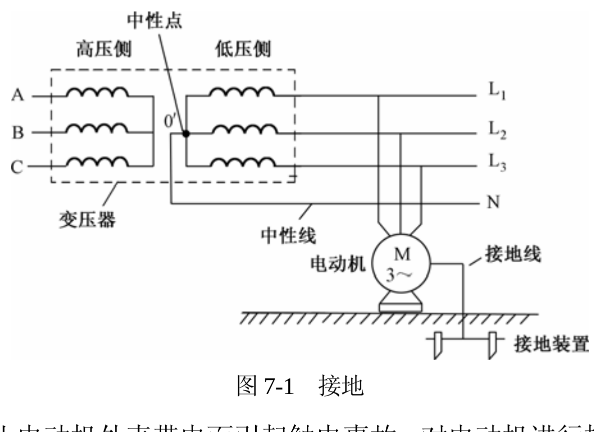


图 7-1　接地

在图中，为了防止电动机外壳带电而引起触电事故，对电动机进行接地，即用一根接地导线将电动机的外壳与埋入地下的接地装置连接起来。当电动机内部绕组与外壳漏电或短路时，外壳会带电，给电动机外壳进行接地后，外壳上的电会沿接地线、接地装置向大地泄放掉。在这种情况下，即使人接触电动机外壳，但由于人体电阻远大于接地线与接地装置的接地电阻（接地电阻通常小 4Ω），外壳上电流绝大多数从接地装置泄入大地，沿人体进入大地的电流很小，不会对人体造成伤害。

7.2.2 接零

接零是指将电气设备的金属外壳或金属支架等与零线连接起来。接零如图 7-2 所示。

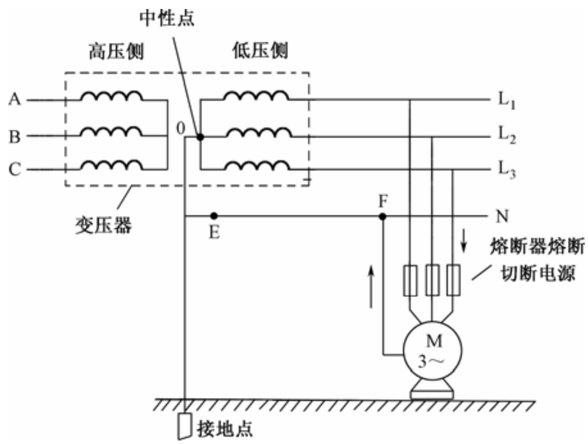


图 7-2 接零

在图中，变压器低压侧的中性点引出线称为零线，零线一方面与接地装置连接，另一方面与 3 根相线一起向用户供电，由于这种供电方式采用 1 根零线和 3 根相线，所以这种供电方式为三相四线制供电。

为了防止电动机外壳带电，除了可以将外壳直接与大地连接外，也可以将外壳与零线连接，当电动机某绕组与外壳短路或漏电时，外壳与绕组间的绝缘电阻下降，有电流会从变压器某相绕组→相线→漏电或短路的电动机绕组→外壳→零线→中性点→相线的另一端，该电流使电动机串接的熔断器熔断，从而保护电动机内部绕组，防止故障范围扩大。在这种情况下，即使熔断器未能及时熔断，由于电动机外壳通过零线接地，外壳上的电压很低，人体接触外壳不会产生触电伤害。

对电气设备进行接零，在电气设备出现短路或漏电时，会让电气设备呈现单相短路，可以让保护装置迅速动作而切断电源，另外通过将零线接地，可以拉低电气设备外壳的电压，从而避免人体接触外壳时出现触电伤害。

7.2.3 重复接地

重复接地是指在零线多处进行接地。重复接地如图 7-3 所示，从图中可以看出，零线除了将中性点接地外，还在 H 点进行了接地。

在零线上重复接地有以下优点。

① **有利于减小零线与地之间的电阻。**零线与地之间的电阻主要由零线自身的电阻决定，零线越长，电阻越大，这样距离接地点越远的位置，零线上的电压越高。图 7-2 中的 F 点距离接地点较远，F 点与接地点之间的电阻就较大，若电动机的绕组与外壳短路或漏电时，虽然外壳通过零线与地连接，但因为外壳与接地点之间的电阻大，所以电动机外壳上仍有较高的电压，人体接触外壳就有触电的危险。如果采用了如图 7-3 所示的重复接地，在零线两处接地，可以

减小零线与地之间的电阻，在电气设备漏电时，可以使电气设备外壳和零线的电压很低，不至于发生触电事故。

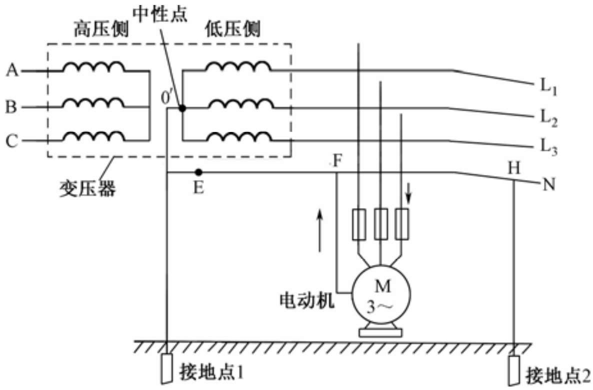


图 7-3　重复接地

② **当零线开路时，可以降低零线电压并避免烧坏单相电气设备。**在如图 7-4 所示的电气线路中，如果零线在 E 点开路，H 点又未接地，此时若电动机 A 的某绕组与外壳短路，这里假设与 L_3 相线连接的绕组与外壳短路，那么 L_3 相线上的电压通过电动机 A 的绕组、外壳加到零线上，零线上的电压大小就与 L_3 相线上的电压一样，由于每根相线与地之间的电压为 220V，因而零线上也有 220V 的电压。而零线又与电动机 B 外壳相连，所以电动机 A 和电动机 B 的外壳都有 220V 的电压，人体接触电动机外壳时就会发生触电。另外，并接在相线 L_2 与零线之间的灯泡两端有 380V 的电压（灯泡相当于接在相线 L_2、L_3 之间），由于正常工作时灯泡两端电压为 220V，而现在由于 L_3 相线与零线短路，使灯泡两端电压变成 380V，灯泡就会烧坏。如果采用了重复接地，在零线 H 点位置也接地，即使 E 点开路，依靠 H 点的接地也可以将零线电压拉低，从而避免上述情况的发生。

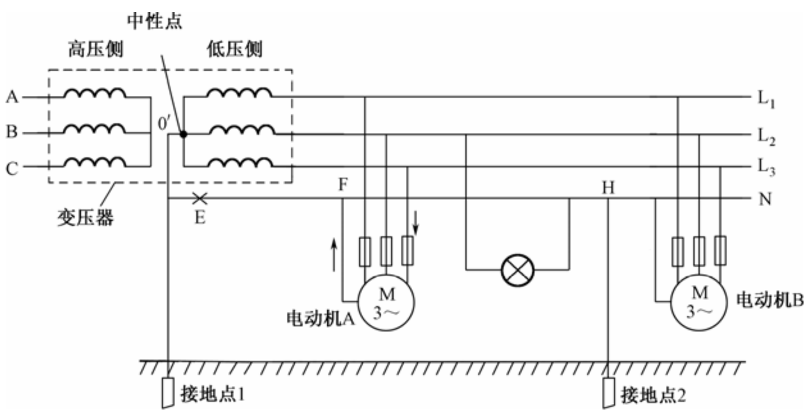


图 7-4　重复接地可以降低零线电压和避免烧坏单相电气设备

7.3 接地装置的安装

接地装置包括接地体和接地线，电气设备通过接地线与接地体进行连接而实现接地。

7.3.1　接地体的安装

接地体是指埋设在地下的导体。接地体包括自然接地体和人工接地体。埋设在地下的各种金属结构的物体（如金属自来水管、建筑用金属桩和钢筋等）都可当做自然接地体；而人工接地体是由人工的方法制作并埋设在地下的金属物体。

如果接地要求不是很高而所在位置又有自然接地体，可以采用自然接地体，否则采用人工接地体。人工接地体可采用如图 7-5 所示的角钢、钢管和铜棒等金属物，为了方便接地体埋入地下，可以将接地体的头部处理成尖角或扁角状。**人工接地体的安装方式有两种：垂直安装和水平安装。**

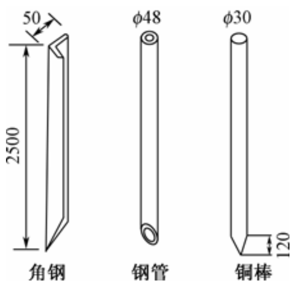


图 7-5　人工接地体采用金属物

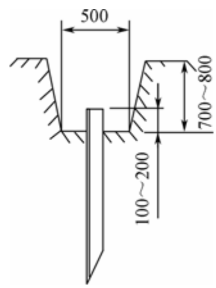


图 7-6　接地体的埋设坑

1．垂直安装

人工接地体的垂直安装是指将人工接地体与地面垂直，通过打桩的方法埋入地下。人工接地体的垂直安装过程如下：

① 挖埋设坑。在要埋设接地体的位置挖出埋设坑，埋设坑的形状和尺寸如图 7-6 所示，在埋设接地体时，要求接地体的顶部离地面大于 0.6m，接地体与附近建筑物距离应大于 1.5m。

② 在坑内将接地体垂直打入地下。

③ 在接地体上连接接地线。引出线与接地体的连接可以采用焊接，也可以采用螺栓和管卡固定，连接方式如图 7-7 所示。

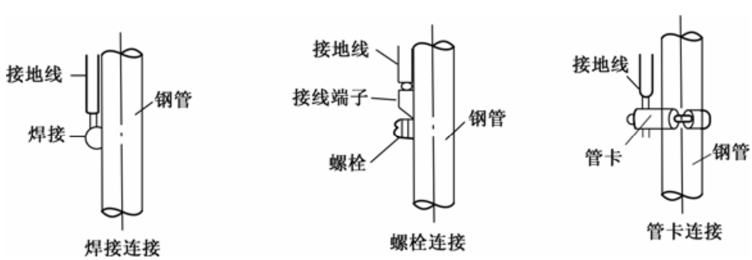


图 7-7　接地体与接地线的连接方式

垂直安装接线体时，可以在地面埋设单个接地体，也可以埋设多个接地体，并将多个接地体连接起来构成多极接地体，具体如图 7-8 所示。

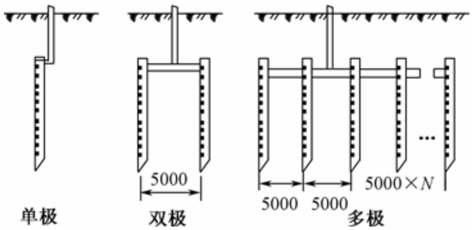


图 7-8　垂直安装接地体

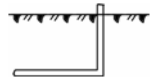


图 7-9　水平安装接地体

2．水平安装

如果安装接地体的地面土层较薄，接地体可以采取水平安装。水平安装接地体时，先挖出不小于 0.6m 深的沟，然后在沟内水平埋设接地体，水平接地体可用扁钢或圆钢，长度可以从几米到十几米。为了方便接上地线，接地体一端要弯成直角并露出地面，再将接地线与露出地面的接地体连接，如图 7-9 所示是一个水平安装好的接地体。

在安装接地体时，为了减小接地电阻小，可采用下面的方法：

① 深埋接地体。距地面越深的土壤，其电阻率越小，故深埋接地体可减小接地电阻。

② 增加接地体的极数。

③ 在土壤电阻率高的地层，可用食盐、木炭拌匀后加水，洒在接地体周围。

④ 在土壤电阻率高的地层，也可以将埋设接地体处的泥土挖走，更换电阻率低的泥土。

7.3.2　接地线的安装

接地线是指连接接地体和电气设备的导线。接地线有自然接地线和人工接地线，自然接地线是有其他用途但可作为接地线的金属导线，如建筑物内的钢筋、配线的钢管等；人工接地线是人工专门制作安装的用做接地线的金属导线。在一般情况下，可尽量利用自然接地线，在要求高或找不到自然接地体时，可安装人工接地线。

接地线可分为接地干线和接地支线，接地支线用来连接接地体和接地干线，接地干线则是用来连接多个接地体或用来连接电气设备和接地支线。接地干线和接地支线如图 7-10 所示。

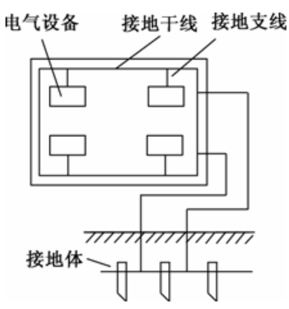


图 7-10　接地干线和接地支线

1．接地线的选择

接地线可选用铜线、铝线、圆钢和扁钢等，具体要求见表 7-3。

表 7-3　接地线的选择

材　　料	类　　别	最小截面积/mm²
铜	裸导体 绝缘导体	1 1.5
铝	裸导体 绝缘导体	6 2.5
扁钢	户内：厚度不小于 3mm 户外：厚度不小于 4mm	24 28
圆钢	户内：厚度不小于 5mm 户外：厚度不小于 6mm	19.6 28.3
钢管	室内使用，壁厚不小于 2.5mm	
铜	电缆接地芯线以及与相线包在同一保护壳内的多芯导线的接地线	1.0
铝		1.5

这里需要补充一点的是，不能用铝导线来连接地下的接地体，可能会经常移动的电气设备必须采用铜芯绝缘软线作为接地支线。

2．接地干线的安装

接地干线用来连接接地支线和接地体或将多极接地体连接起来。接地干线安装时的要点如下：

① 接地干线与接地体的连接可采用电焊焊接，也可采用螺栓连接，在用电焊焊接后，要涂沥青或防腐漆，用螺栓连接时，要对连接处进行除锈。

② 连接多极接地体的接地干线和接地干线与接地支线的连接处，应安排在地沟内，并盖有沟盖。

③ 在室内布置接地干线时，一般沿墙面敷设，接地干线距地面约 300mm，距墙面约 15mm，并用线卡固定好。

④ 在用圆钢或扁钢做接地干线时，接地干线之间的连接或接地干线的加长都要用电焊焊接。

3．接地支线的安装

接地支线用来连接接地干线和电气设备。接地支线的安装时的要点如下：

① 接地支线与接地干线、电气设备连接时，可采用电焊焊接，也可以用螺栓连接，要求连接处接触良好，并且牢固可靠。

② 每一台电气设备都必须用单独的接地支线与干线连接，不能多台设备共用一根接地支线，也不能将多台设备的接地支线连接到接地干线的同一连接点上。

③ 若安装位置易被接触，应选用多股绝缘导线作为接地线。

④ 对于移动的电气设备（如冰箱、洗衣机），它们采用三极电源插头，如图 7-11 所示。

电气设备的外壳通过导线与三芯电源插头的接地端连接，这种插头需要插入三极插座中，三极插座可采用如图 7-12（a）所示的接线方式，这样移动设备的外壳通过三极插头接地线、三极插座接地线和接地支线与接地干线进行连接。如果室内没有安装专门的接地线，也可以按如图 7-12（b）所示的方法，将三极插座的接地端与已接地的零线连接或悬空不接。

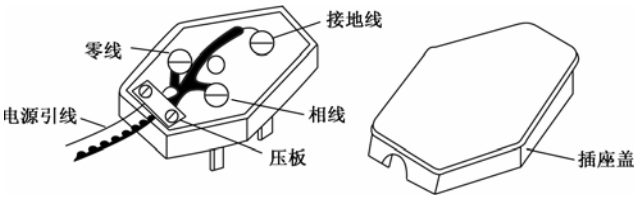


图 7-11　三极插座的结构

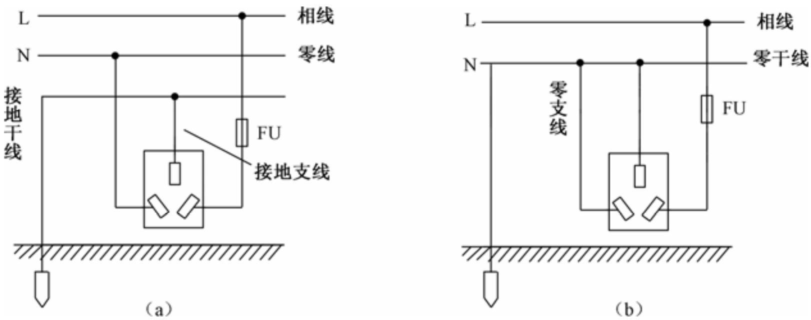
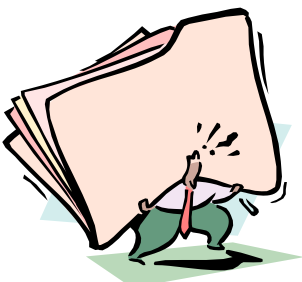


图 7-12　三极插座的安装

第 8 章

电　动　机



问：老师，听说电动机种类很多，常用的有哪几种呢？

答：电动机是一种将电能转换为机械能的设备。常用的电动机有三相异步电动机、直流电动机和单相异步电动机等。



8.1 三相异步电动机

三相异步电动机是一种在工业领域应用极为广泛的电动机。在工作时，三相异步电动机需要提供三相交流电压。

8.1.1　工作原理

1．磁铁旋转对导体的作用

下面通过一个实验来说明异步电动机的工作原理，实验如图 8-1（a）所示，在一个马蹄形的磁铁中间放置一个带转轴的闭合线圈，当摇动手柄来旋转磁铁时会发现，线圈会跟随着磁铁一起转动。为什么会出现这种现象呢？

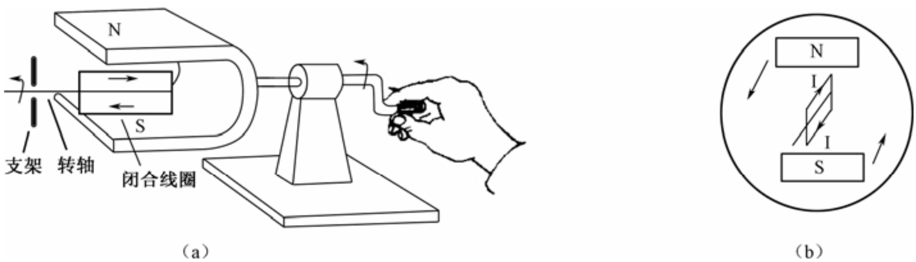


图 8-1　单匝闭合线圈旋转原理

图 8-1（b）是与图 8-1（a）对应的原理简化图。当磁铁旋转时，闭合线圈的上下两段导线会切割磁铁的磁场，两段导线都会产生感应电流。由于磁铁是逆时针方向旋转，如果假设磁铁不动，那么线圈则可以看做顺时针方向运动。

线圈产生的电流方向判断：从图中可以看出，磁场方向由上往下穿过导线，上段导线的运动方向可以看成向右，下段导线则可以看成向左，根据右手定则（具体内容详见第 1 章）可以判断出线圈的上段导线的电流方向由外往内，下段导线的电流方向则是由内往外。

线圈运动方向的判断：当磁铁逆时针旋转时，线圈的上、下段导线都会产生电流，通电导体在磁场中会受到力，受力方向可根据左手定则来判断，判断结果可知线圈的上段导线受力方向是往左，下段导线受力方向往右，这样线圈会沿逆时针方向旋转。

如果将图 8-1 中的单匝闭合导体转子换成如图 8-2（a）所示的笼形转子，然后旋转磁铁，结果也会发现笼形转子也会随磁铁一起转动。图中笼形转子的两端是金属环，金属环中间安插多根金属条，每两根相对应的金属条通过两端的金属环构成一组闭合的线圈，所以笼形转子可以看成是多组闭合线圈的组合。当旋转磁铁时，笼形转子上的金属条会切割磁感线而产生感应电流，有电流通过的金属条受磁场的作用力而运动，根据图 8-2（b）的示意图可以分析出，各金属条的受力方向都是逆时针方向，所以笼形转子沿逆时针方向旋转起来。

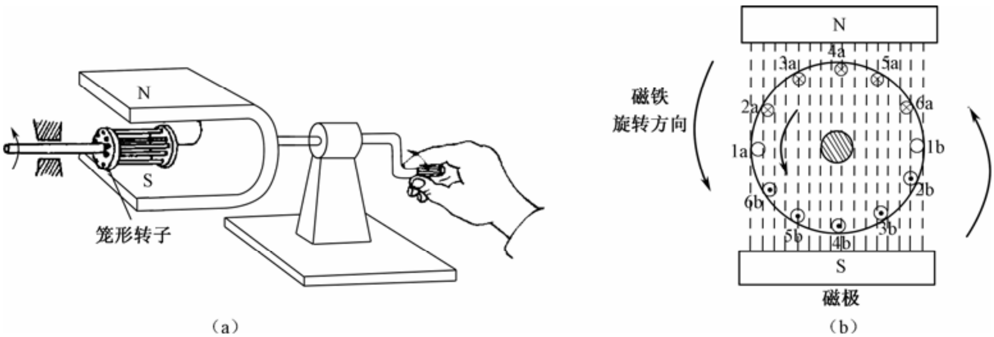


图 8-2　笼形转子旋转原理

综上所述，当旋转磁铁时，磁铁产生的磁场也随之旋转，处于磁场中的闭合导体会因此切割磁感线而产生感应电流，而有感应电流的导体在磁场中又会受到磁场力，在磁场力的作用下导体就旋转起来。

2．异步电动机的工作原理

采用旋转磁铁产生旋转磁场让转子运动，并没有实现电能转换成机械能。实践和理论都证明，如果在转子的圆周空间放置互差 120° 的三组线圈，如图 8-3 所示，然后将这三组线圈按星形或三角形接法接好，如图 8-4 所示是按星形接法接好的三组线圈，然后将三组线圈与三相交流电压接好，有三相交流电流流进三组线圈，这三组线圈会产生类似图 8-2 中磁铁产生的旋转磁场。处于此旋转磁场中的转子上的各闭合导体有感应电流产生，磁场对有电流流过的导体产生作用力，推动各导体按一定的方向运动，转子也就运转起来。

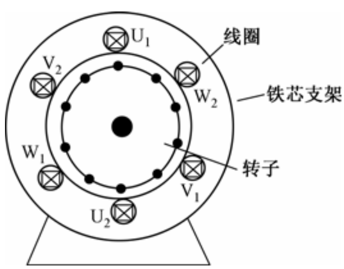


图 8-3　三相电动机互差 120° 的三组绕组

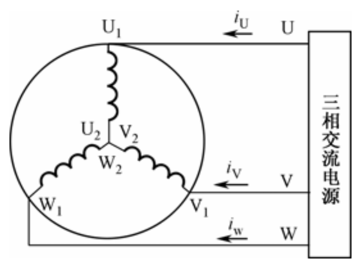


图 8-4　三组绕组与三相电源进行星形连接

图 8-3 实际上是三相异步电动机的结构示意图。线圈绕在铁芯支架上，由于线圈和铁芯都固定不动，故称为定子，定子中间是笼形转子。转子运转可以看成是线圈产生的旋转磁场推动的，旋转磁场有一定的转速，旋转磁场的转速 n（又称同步转速）、三相交流电的频率 f 和磁极对数 p（一对磁极有两个相异的磁极）有以下关系：

$$n = 60\frac{f}{p}$$

例如一台三相异步电动机定子绕组的交流电压频率 f=50Hz，定子绕组的磁极对数 p=3，那么旋转磁场的转数 $n=60\times\frac{50}{3}$ =1000n/min。

电动机在运转时，其转子的转向与旋转磁场是相同的，但由于转子是由旋转磁场作用而转

动的，所以转子的转速要落后于旋转磁场的转速，并且要滞后于旋转磁场，也就是说，转子与旋转磁场的转速不同步。这种**转子转速与旋转磁场转速不同步的电动机称为异步电动机。**

8.1.2　外形与结构

1．外形

图 8-5 列出了两种三相异步电动机的实物外形。

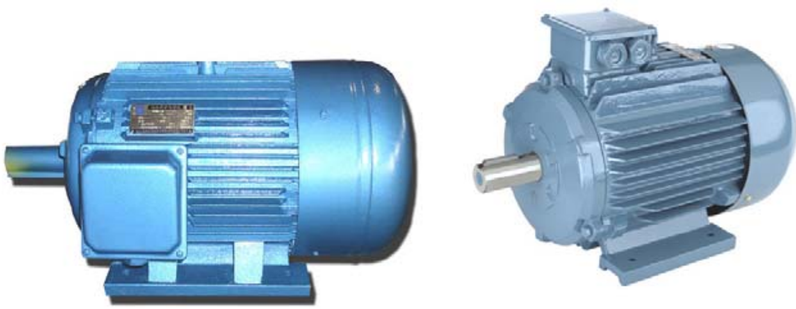


图 8-5　三相异步电动机的实物外形

2．结构

三相异步电动机主要由外壳、定子、转子等部分组成，其详细结构如图 8-6 所示。

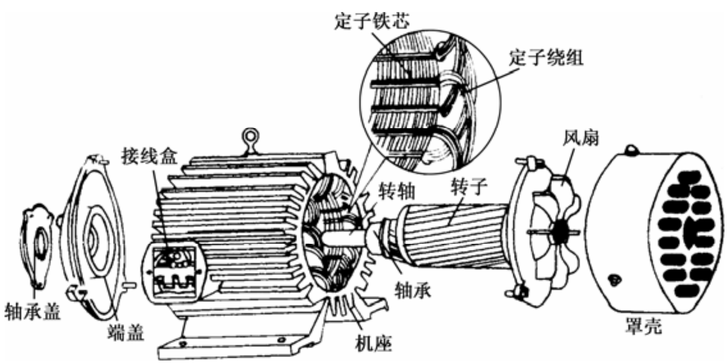


图 8-6　三相异步电动机的结构

（1）外壳

三相异步电动机的外壳主要由机座、轴承盖、端盖、接线盒、风扇和罩壳等组成。

（2）定子

定子由定子铁芯和定子绕组组成。

① **定子铁芯。**定子铁芯通常是由很多圆环状的硅钢片叠合在一起组成的，这些硅钢片中间开有很多小槽，用于嵌入定子绕组（也称定子线圈），硅钢片上涂有绝缘层，使叠片之间绝缘。

② **定子绕组。**它通常是由涂有绝缘漆的铜线绕制而成的，再将绕制好的铜线按一定的规律嵌入定子铁芯的小槽内，具体见图 8-11 放大部分所示。绕组嵌入小槽后，按一定的方法将

槽内的绕组连接起来，使整个铁芯内的绕组构成 U、V、W 三相线圈，再将三相线圈的首、末端引出来，接到接线盒的 U_1、U_2、V_1、V_2、W_1、W_2 接线柱上，接线盒如图 8-7 所示。接线盒各接线柱与电动机内部绕组的连接关系如图 8-8 所示。

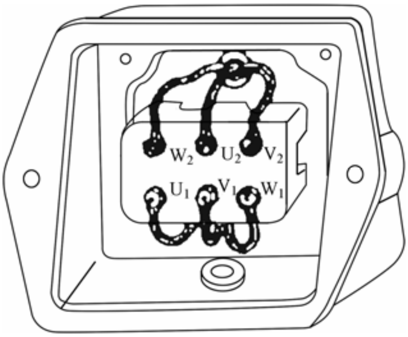


图 8-7　电动机的接线盒

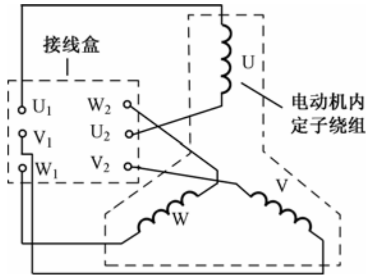


图 8-8　接线盒接线柱与电动机内部绕组的连接关系

（3）转子

转子是电动机运转部分，它由转子铁芯、转子线组和转轴组成。

① **转子铁芯**。转子铁芯是由很多外圆开有小槽的硅钢片叠在一起构成的，如图 8-9 所示，小槽用来放置转子绕组。

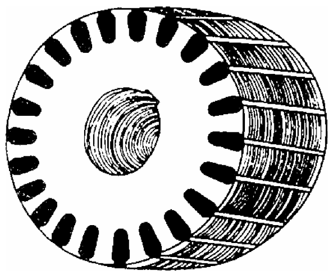


图 8-9　由硅钢片叠成的转子铁芯

② **转子绕组**。转子绕组嵌在转子铁芯的小槽中，转子绕组可分为笼式绕组和线绕式绕组。

笼式转子绕组是在转子铁芯的小槽中放入金属导条，再在铁芯两端用导环将各导条连接起来，这样任意一根导条与它对应的导条通过两端的导环就构成了一个闭合的绕组。由于这种绕组形似笼子，故称为笼式转子绕组。笼式转子绕组有铜条转子绕组和铸铝转子绕组两种，如图 8-10 所示。铜条转子绕组是在转子铁芯放入铜导条，然后在两端用金属端环将它们焊接起来，而铸铝转子绕组则是用浇铸的方法在铁芯上浇铸出铝导条、端环和风叶。

线绕式绕组如图 8-11 所示，它是在转子铁芯中按一定的规律嵌入用绝缘导线绕制好的线圈，然后将线圈按三角形或星形接法接好，大多数按星形方式接线，如图 8-12 所示。线圈接好后引出三根相线，通过转轴内孔接到转轴的三个铜制集电环（又称滑环）上。集电环随转轴一起运转，集电环与固定不动的电刷摩擦接触，而电刷通过导线与变阻器连接，这样转子绕组产生的电流通过集电环、电刷、变阻器构成回路。调节变阻器可以改变转子绕组回路的电阻，从而改变绕组的电流，从而调节转子的转速。

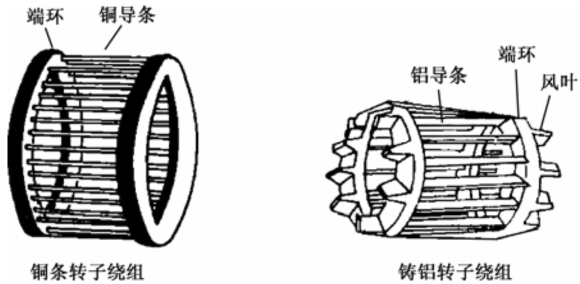


图 8-10　两种笼式转子绕组

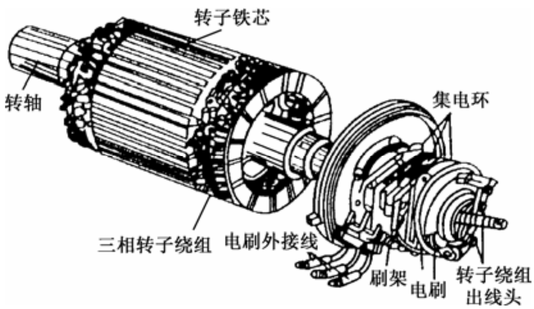


图 8-11　线绕式绕组

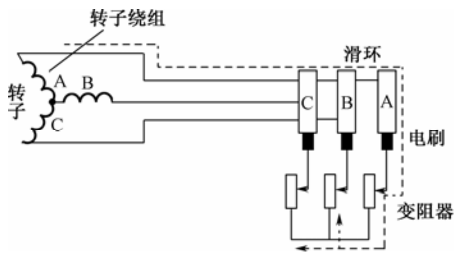


图 8-12　按星形连接的线绕式绕组

③ **转轴**。转轴紧套在转子铁芯的中心，当定子绕组通三相交流电后会产生旋转磁场，转子绕组受旋转磁场作用而旋转，它通过铁芯带动转轴转动，将动力从转轴传递出来。

8.1.3　接线方式

三相异步电动机的定子绕组由 U、V、W 三相线圈组成，这三相线圈有 6 个接线端，它们与接线盒的 6 个接线柱连接，接线盒如图 8-12 所示。在接线盒上，可以通过将不同的接线柱短接来将定子绕组接成星形接法或三角形接法。三相异步电动机的定子绕组接线方式说明见表 8-1。

表 8-1　三相异步电动机的定子绕组接线方式说明

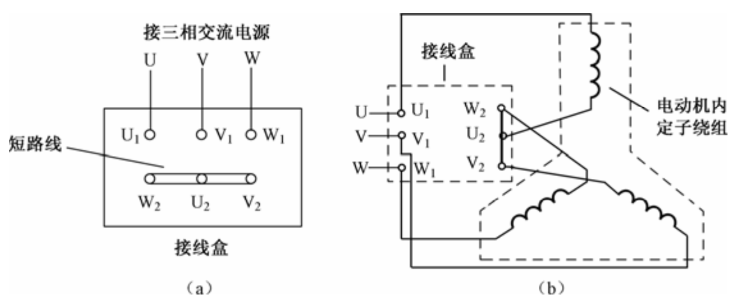
<table>
<tr><th>接线方式</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td>星形接线法</td><td>要将定子绕组接成星形接法，可按如图 1（a）所示的方法接线。接线时，用短路线把接线盒中的 W_2、U_2、V_2 三个接线柱短接起来，这样就将电动机内部的绕组接成了星形接法，如图 1（b）所示。


图 1　定子绕组按星形接法接线</td></tr>
</table>

续表

<table>
<tr><th>接线方式</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td>三角形接线法</td><td>

要将电动机内部的三相绕组接成三角形接法，可用短路线将接线盒中的 U_1 和 W_1、V_1 和 U_2、W_1 和 V_2 接线柱按如图 2 所示的方法接起来，然后从 U_1、V_1、W_1 接线柱分别引出导线，与三相交流电源三根相线连接。

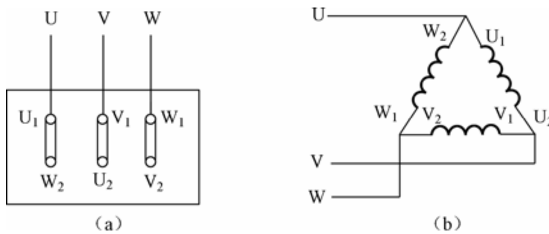


图 2　定子绕组按三角形接法接线

如果三相交流电源的相线之间的电压是 380V，那么对于定子绕组按星形接法的电动机，其每相绕组承受的电压为 220V，对于定子绕组按三角形接法的电动机，其每相绕组承受的电压为 380V，所以按三角形接法的电动机在工作时，其定子绕组将承受更高的电压。

</td></tr>
</table>

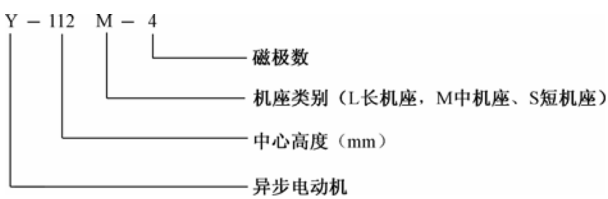
8.1.4　电动机的铭牌

三相异步电动机一般会在外壳上安装一个铭牌，铭牌就相当于简单的说明书，它标注了电动机的型号、主要技术参数等信息。下面以图 8-13 所示的铭牌为例来说明铭牌上各项内容的含义。



图 8-13　三相异步电动机的铭牌

（1）型号（Y112M-4）。型号通常是由字母和数字组成，其含义说明如下：



（2）额定功率（功率 4.0kW）。该功率是在额定状态工作时电动机所输出的机械功率。

（3）额定电流（电流 8.8A）。该电流是在额定状态工作时流入电动机定子绕组的电流。

（4）额定电压（电压 380V）。该电压是在额定状态工作时加到定子绕组的线电压。

（5）额定转速（转速 1440r/min）。该转速是在额定工作状态时电动机转轴的转速。

（6）噪声等级（LW82dB）。噪声等级通常用 LW 值表示，LW 值的单位是 dB（分贝），LW 值越小，表示电动机运转时噪声越小。

（7）连接方式（△连接）。该连接方式是指在额定电压下，定子绕组采用的连接方式，连接方式有三角形（△）和星形（Y）两种，在电动机工作前，要在接线盒中将定子绕组接成铭牌要求的接法。

如果接法错误，轻则电动机工作效率降低，重则损坏电动机。例如：若将要求按星形接法的绕组接成三角形，那么绕组承受的电压会很高，流过的电流会增大，而易使绕组烧坏；若将要求按三角形接法的绕组接成星形，那么绕组上的电压会降低，流过绕组的电流减小而使电动机功率下降。一般地，功率小于或等于 3kW 的电动机，其定子绕组应按 Y 形接法，功率为 4kW 及以上的电动机，定子绕组应采用△接法。

（8）防护等级（IP44）。表示电动机外壳采用的防护方式。IP11 是开启式，IP22、IP33 是防护式，而 IP44 是封闭式。

（9）工作频率（50Hz）。表示电动机所接交流电源的频率。

（10）工作制（S1）。它是指电动机的运行方式，一般有三种：S_1（连续运行）、S_2（短时运行）和 S_3（断续运行）。连续运行是指电动机在额定条件下（即与铭牌要求的条件下）可长时间连续运行；短时运行是指在额定条件下只能在规定的短时间内运行，运行时间通常有 10min、30min、60min 和 90min 四种；断续运行是指在额定条件下运行一段时间再停止一段时间，按一定的周期反复进行，一般 1 个周期为 10min，负载持续率有 15%、25%、40%和 60%四种；如对于负载持续率为 60%的电动机，要求运行 6min，停止 4min。

（11）绝缘等级（B 级）。它是指电动机在正常情况下工作时，绕组绝缘允许的最高温度值，通常分为 7 个等级，具体如表 8-2 所示。

表 8-2　绝缘等级

绝 缘 等 级	Y	A	E	B	F	H	C
极限工作温度（℃）	90	105	120	130	155	180	180 以上

8.2 直流电动机

直流电动机是一种采用直流电源供电的电动机。直流电动机具有启动力矩大、调速性能好和磁干扰少等优点，它不但可用在小功率设备中，还可用在大功率设备中，如大型可逆轧钢机、卷扬机、电力机车、电车等设备常用直流电动机作为动力源。

8.2.1　工作原理与结构

1. 工作原理

直流电动机是根据通电导体在磁场中受力旋转来工作的。直流电动机结构与工作原理如图 8-14 所示。从图中可看出，直流电动机主要由磁铁、转子线圈（又称电枢绕组）、电刷和换

向器组成。电动机的换向器与转子线圈连接，换向器再与电刷接触，电动机在工作时，换向器与转子线圈同步旋转，而电刷静止不动。当直流电源通过导线、电刷、换向器为转子线圈供电时，通电的转子线圈在磁铁产生的磁场作用下会旋转起来。

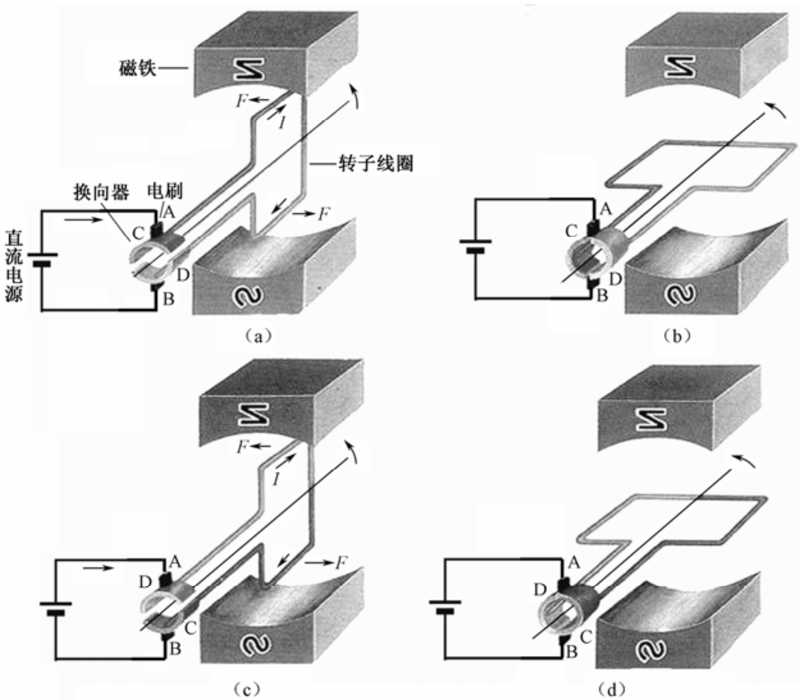


图 8-14　直流电动机结构与工作原理

直流电动机工作过程分析如下：

（1）当转子线圈处于如图 8-14（a）所示的位置时，流过转子线圈的电流方向是电源正极→电刷 A →换向器 C→转子线圈→换向器 D→电刷 B→电源负极。根据左手定则可知，转子线圈上导线受到的作用力方向为左，下导线受力方向为右，于是转子线圈按逆时针方向旋转。

（2）当转子线圈转至图 8-14（b）所示的位置时，电刷 A 与换向器 C 脱离断开，电刷 B 与换向器 D 也断开，转子线圈无电流通过，不受磁场作用力，但由于惯性作用，转子线圈会继续逆时针旋转。

（3）在转子线圈由图 8-14（b）位置旋转到图 8-14（c）位置期间，电刷 A 与换向器 D 接触，电刷 B 与换向器 C 接触，流过转子线圈的电流方向是电源正极→电刷 A →换向器 D→转子线圈→换向器 C→电刷 B→电源负极。转子线圈上导线（即原下导线）受到的作用力方向为左，下导线（即原上导线）受力方向为右，转子线圈按逆时针方向继续旋转。

（4）当转子线圈转至图 8-14（d）所示的位置时，电刷 A 与换向器 D 脱离断开，电刷 B 与换向器 C 断开，转子线圈无电流通过，不受磁场作用力，由于惯性作用，转子线圈会继续逆时针旋转。

以后会不断重复上述过程，转子线圈就持续不断地旋转起来。直流电动机中的换向器和电刷的作用是当转子线圈转到一定位置时能及时改变转子线圈中电流的方向，这样才能让转子线

圈连续不断地运转。

2. 外形与结构

（1）外形

如图 8-15 所示是一些常见直流电动机的实物外形。



图 8-15　常见直流电动机的外形

（2）结构

直流电动机的典型结构如图 8-16 所示。从图中可以看出，直流电动机主要由前端盖、风扇、机座（含磁铁或励磁绕组等）、转子（含换向器）、电刷装置和后端盖组成。在机座中，有的电动机安装有磁铁，如永磁直流电动机，有的电动机则安装有励磁绕组（用来产生磁场的线圈），如并励直流电动机、串励直流电动机等。直流电动机的转子中嵌有转子绕组，转子绕组通过换向器与电刷接触，直流电源通过电刷、换向器为转子绕组供电。

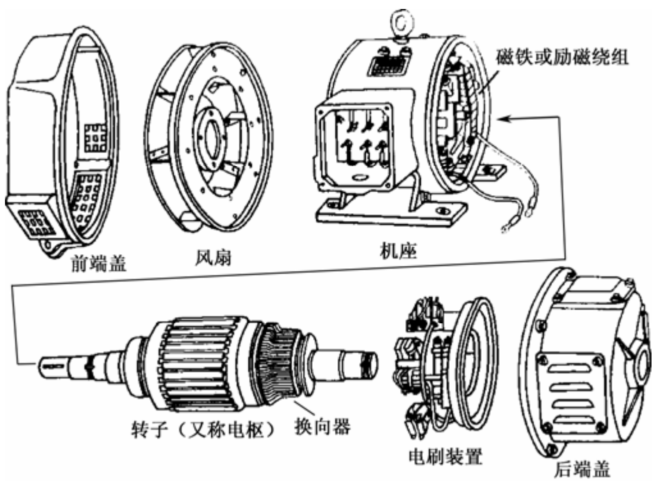


图 8-16　直流电动机的典型结构

8.2.2 种类与特点

直流电动机种类很多，根据励磁方式不同，可分为永磁直流电动机、他励直流电动机、并励直流电动机、串励直流电动机和复励直流电动机。在这些类型的直流电动机中，除了永磁直流电动机的励磁磁场由永久磁铁产生外，其他几种励磁磁场都由励磁绕组来产生，这些励磁磁场由励磁绕组产生的电动机又称电磁电动机。直流电动机种类与特点说明见表 8-3。

表 8-3 直流电动机种类与特点说明

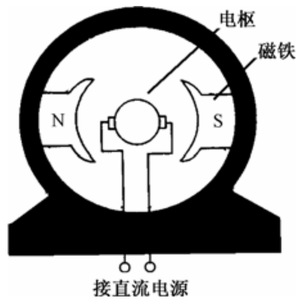
<table>
<tr><th>类型</th><th>说　明</th></tr>
<tr><td>永磁直流电动机</td><td>永磁直流电动机是指采用永久磁铁作为定子来产生励磁磁场的电动机。永磁直流电动机的结构如图 1 所示。从图中可以看出，这种直流电动机定子为永久磁铁，当给电枢（转子）绕组通直流电时，在磁铁产生的磁场作用下，电枢会运转起来。


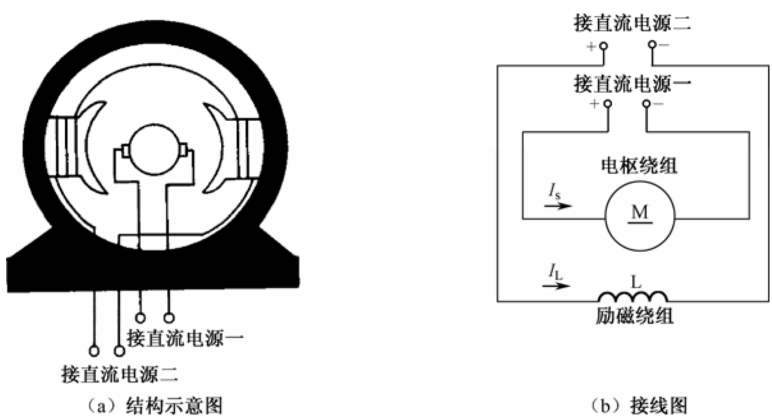
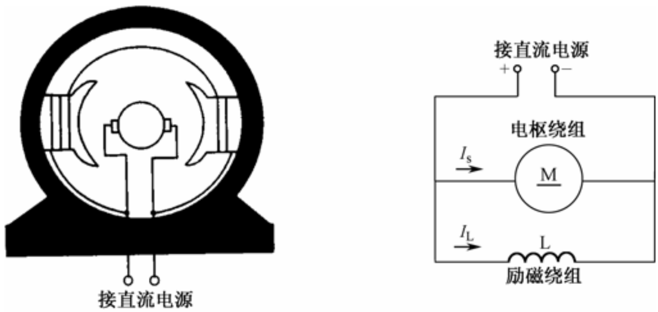
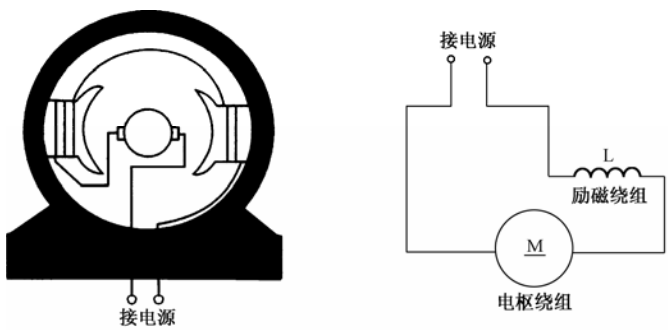
图 1 永磁直流电动机的结构
永磁直流电动机具有结构简单、价格低廉、体积小、效率高和使用寿命长等优点。永磁直流电动机开始主要用在一些小功率设备中，如电动玩具、小电器和家用音像设备等。近年来由于强磁性的钕铁硼永磁材料的应用，一些大功率的永磁直流电动机开始出现，使永磁直流电动机应用更为广泛。</td></tr>
<tr><td>他励直流电动机</td><td>他励直流电动机是指励磁绕组和电枢绕组分别由不同直流电源供电的直流电动机。他励直流电动机的结构与接线如图 2 所示。从图中可以看出，他励直流电动机的励磁绕组和电枢绕组分别由两个单独的直流电源供电，两者互不影响。


图 2 他励直流电动机的结构与接线</td></tr>
</table>

续表

类型	说　　明
	他励直流电动机的励磁绕组由独立的励磁电源供电，故其励磁电流不受电枢绕组电流影响，在励磁电流不变的情况下，电动机的启动转矩与电枢电流成正比。他励直流电动机可以通过改变励磁绕组或电枢绕组的电流大小来提高或降低电动机的转速。
并励直流电动机	**并励直流电动机是指励磁绕组和电枢绕组并联，并且由同一直流电源供电的直流电动机。**并励直流电动机结构与接线如图 3 所示。从图中可以看出，并励直流电动机的励磁绕组和电枢绕组并接在一起，并且接同一直流电源。  （a）结构示意图　（b）接线图 图 3　并励直流电动机结构与接线 并励直流电动机的励磁绕组采用较细的导线绕制而成，其匝数多、电阻大且励磁电流较恒定。电动机启动转矩与电枢绕组电流成正比，启动电流约为额定电流的 2.5 倍左右，转速随电流及转矩的增大而略有下降，短时过载转矩约为额定转矩的 1.5 倍。
串励直流电动机	**串励直流电动机是指励磁绕组和电枢绕组串联，再接同一直流电源的直流电动机。**串励直流电动机结构与接线如图 4 所示。从图中可以看出，串励直流电动机的励磁绕组和电枢绕组串接在一起，并且由同一直流电源供电。  （a）结构示意图　（b）接线图 图 4　串励直流电动机结构与接线 串励直流电动机的励磁绕组和电枢绕组串联，故励磁磁场随着电枢电流的改变有显著的变化。为了减小励磁绕组的损耗和电压降，要求励磁绕组的电阻应尽量小，所以励磁绕组通常用较粗的导线绕制而成，并且匝数较少。串励直流电动机的转矩近似与电枢电流的平方成正比，转速随转矩或电流的增加而迅速下降，其启动转矩可达额定转矩的 5 倍以上，短时间过载转矩可达额定转矩的 4 倍以上，串励直流电动机轻载或空载时转速很高，为了安全起见，一般不允许空载启动，不允许用皮带或链条传动。

续表

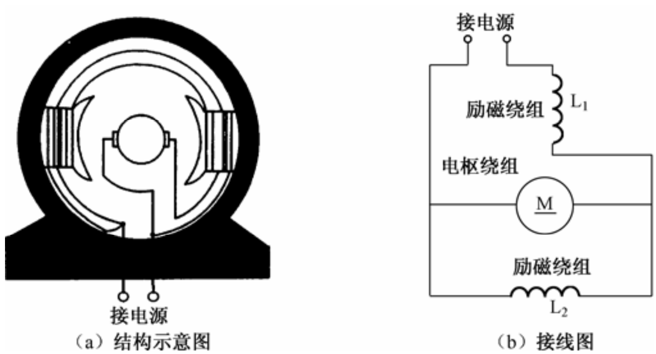
<table>
<tr><th>类型</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td></td><td>串励直流电动机还是一种交直流两用电动机，既可用直流供电，也可用单相交流供电。因为交流供电更为方便，所以串励直流电动机又称做单相串励电动机。由于串励直流电动机具有交直流供电的优点，故应用较广泛，如电钻、电吹风、电动缝纫机和吸尘器中常采用串励直流电动机作为动力源。</td></tr>
<tr><td>复励直流电动机</td><td>复励直流电动机有两个励磁绕组，一个与电枢绕组串联，另一个与电枢绕组并联。复励直流电动机结构与接线如图 5 所示。从图中可以看出，复励直流电动机的一个励磁绕组 L_1 和电枢绕组串接在一起，另一个励磁绕组 L_2 与电枢绕组为并联关系。


图 5　复励直流电动机结构与接线
复励直流电动机的串联励磁绕组匝数少，并联励磁绕组匝数多，两个励磁绕组产生的磁场方向相同的电动机称为积复励电动机，反之称为差复励电动机。由于积复励电动机工作稳定，所以更为常用。复励直流电动机启动转矩为额定转矩的 4 倍左右，短时间过载转矩为额定转矩的 3.5 倍左右。</td></tr>
</table>

8.3 单相异步电动机

单相异步电动机是一种采用单相交流电源供电的小容量电动机。它具有供电方便、成本低廉、运行可靠、结构简单和振动噪声小等优点，广泛应用在家用电器、工业和农业等领域的中小功率设备中。**单相异步电动机可分为分相式单相异步电动机和罩极式单相异步电动机。**

8.3.1　分相式单相异步电动机

分相式单相异步电动机是指将单相交流电转变为两相交流电来启动运行的单相异步电动机。

1. 结构

分相式单相异步电动机种类很多，但结构基本相同，分相式单相异步电动机典型结构如图 8-17 所示。从图中可以看出，其结构与三相异步电动机基本相同，都是由机座、定子绕组、转子、轴承、端盖和接线等部分组成。定子绕组与转子实物外形如图 8-18 所示。

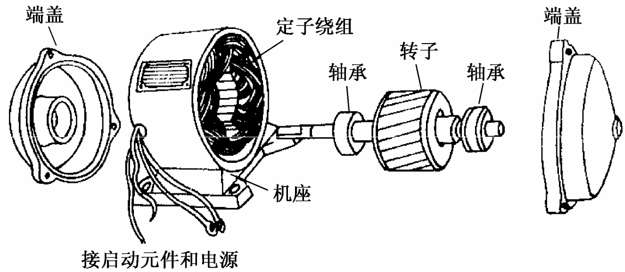


图 8-17　分相式单相异步电动机的典型结构

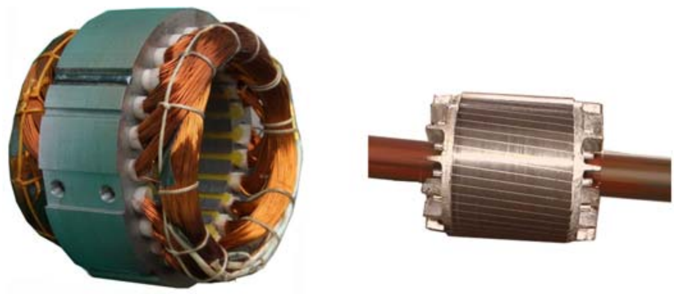


图 8-18　定子绕组与转子实物外形

2. 工作原理

三相异步电动机的定子绕组有 U、V、W 三相，当三相绕组接三相交流电时会产生旋转磁场推动转子旋转。单相异步电动机在工作时接单相交流电源，所以定子应只有一相绕组，如图 8-19（a）所示，而单相绕组产生的磁场不会旋转，故转子不会产生转动。

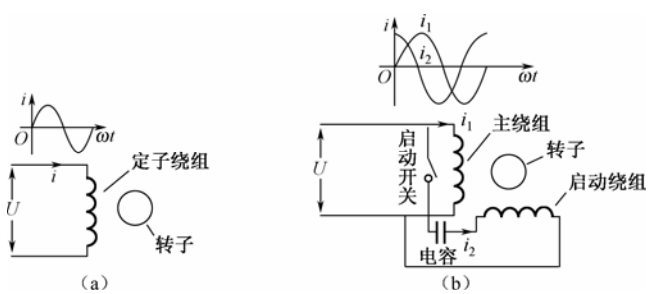


图 8-19　单相异步电动机工作原理

为了解决这个问题，**分相式单相异步电动机定子绕组通常采用两相，一相绕组称为工作绕组（或主绕组），另一相称为启动绕组（或副绕组）**，如图 8-19（b）所示。两相绕组在定子铁芯上的位置相差 90°，并且给启动绕组串接电容将交流电源相位改变 90°（超前移相 90°），当单相交流电源加到定子绕组时，有 i_1 电流直接流入主绕组，i_2 电流经电容超前移相 90° 后流入启动绕组。两个相位不同的电流分别流入空间位置相差 90° 的两个绕组，两绕组就会产生旋转磁场，处于旋转磁场内的转子就会随之旋转起来。

转子运转后，如果断开启动开关切断启动绕组，转子仍会继续运转，这是因为单独主绕组产生的磁场不会旋转，但由于转子已转动起来，若将已转动的转子看成不动，那么主绕组的磁

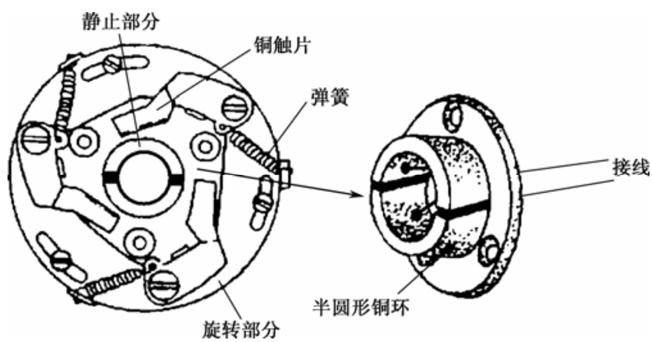
场就相当于发生了旋转，故转子会继续运转。

由此可见，**启动绕组的作用就是启动转子旋转，转子继续旋转依靠主绕组就可单独实现，所以有些分相式单相异步电动机在启动后就将启动绕组断开，只让主绕组工作。**对于主绕组正常、启动绕组损坏的单相异步电动机，通电后不会运转，但若用人工的方法使转子运转，电动机可以仅在主绕组的作用下一直运转下去。

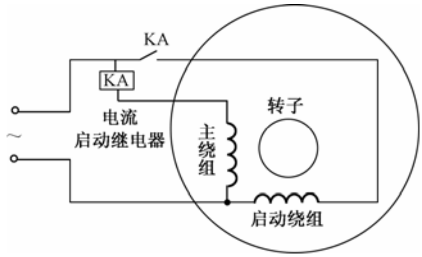
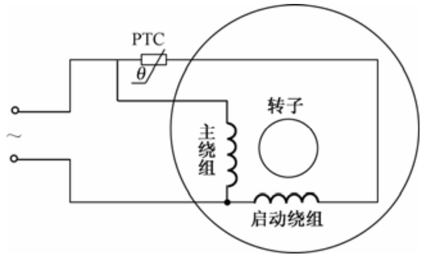
3. 启动元件

分相式单相异步电动机启动后是通过启动元件来断开启动绕组的。**分相式单相异步电动机常用的启动元件主要有离心开关、启动继电器和 PTC 等。**分相式单相异步电动机的启动元件说明见表 8-4。

表 8-4　分相式单相异步电动机的启动元件说明

启动元件	说　　明
离心开关	**离心开关是一种利用物体运动时产生的离心力来控制触点通断的开关。**图 1 是一种常见的离心开关结构图，它分为静止部分和旋转部分。静止部分一般与电动机端盖安装在一起，它主要由两个相互绝缘的半圆铜环组成，这两个铜环就相当于开关的两个触片，它们通过引线与启动绕组连接；旋转部分与电动机转子安装在一起，它主要由弹簧和三个铜触片组成，这三个铜触片通过导体连接在一起。 电动机转子未旋转时，依靠弹簧的拉力，旋转部分的三个铜触片与静止部分的两个半圆形铜环接触，两个半圆形铜环通过铜触片短接，相当于开关闭合；当电动机转子运转后，离心开关的旋转部分也随之旋转，当转速达到一定值时，离心力使三个铜触片与铜环脱离，两个半圆铜环之间又相互绝缘，相当于开关断开。  图 1　一种常见离心开关的结构
启动继电器	**启动继电器种类较多，其中电流启动继电器最为常见。**图 2 是采用了电流启动继电器的单相异步电动机接线图，继电器的线圈与主绕组串接在一起，常开触头与启动绕组串接。在启动时，流过主绕组和继电器线圈的电流很大，继电器常开触头闭合，有电流流过启动绕组，电动机被启动运转，随着电动机转速的提高，流过主绕组的电流减小，当减小到某一值时，继电器线圈电流不足以吸合常开触头，触头断开切断启动绕组。

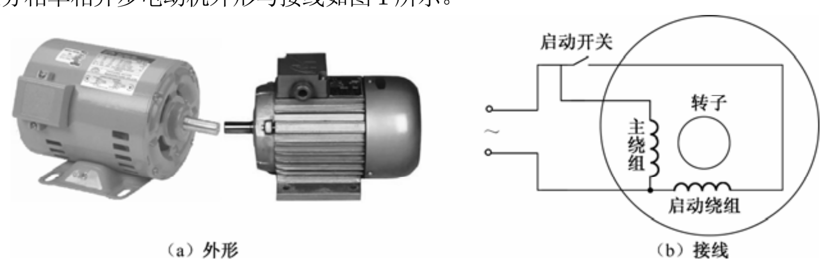
续表

启动元件	说　　明
	 图 2　采用电流启动继电器的单相异步电动机接线图
PTC	**PTC 是指具有正温度系数的热敏元件，最为常见的 PTC 为正温度系数热敏电阻器。PTC 的特点是在低温时阻值很小，当温度升高到一定值时阻值急剧增大。PTC 的这种特点与开关相似，其阻值小时相当于开关闭合，阻值很大时相当于开关断开。** 图 3 是采用 PTC（正温度系数热敏电阻器）作为启动开关的单相异步电动机接线图。在启动时，由于 PTC 温度低阻值小，故有电流流过 PTC 和启动绕组，电动机被启动。因启动时有电流流过 PTC，其温度升高，阻值增大，相当于开路，故启动后 PTC 将启动绕组切断。  图 3　采用 PTC 作为启动开关的单相异步电动机接线图

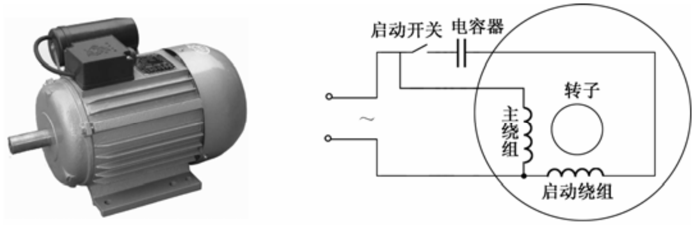
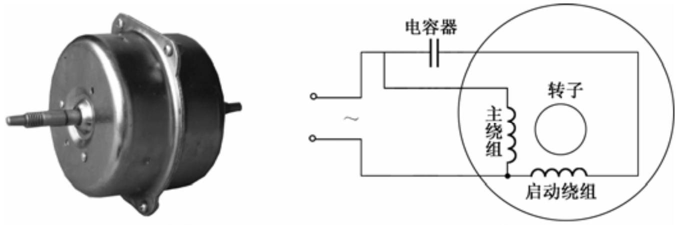
4. 分相式单相异步电动机的种类

分相式单相异步电动机通常可分电阻分相单相异步电动机、电容分相启动单相异步电动机、电容运行单相异步电动机和电容启动运行单相异步电动机。分相式单相异步电动机种类说明见表 8-5。

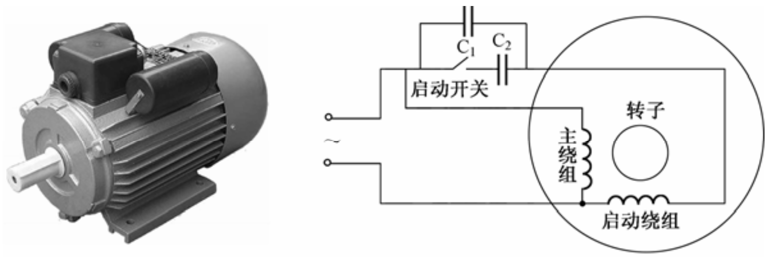
表 8-5　分相式单相异步电动机种类说明

类型	说　　明
电阻分相异步电动机	**电阻分相单相异步电动机是指在启动绕组回路串接启动开关，并且转子运转后断开启动绕组的单相异步电动机。** 电阻分相单相异步电动机外形与接线如图 1 所示。  图 1　电阻分相单相异步电动机

续表

类型	说　　明
	从图 1（b）接线图可以看出，电阻分相单相异步电动机的启动绕组与一个启动开关（也可以是启动继电器或 PTC）串接在一起，在刚通电时启动开关闭合，有电流通过启动绕组，当转子启动转速达到额定转速 75%～80%时，启动开关断开，转子在主绕组的磁场作用下继续运转。 为了让启动绕组和主绕组流过的电流相位不同（只有两绕组电流相位不同，才能产生旋转磁场），在设计时让启动绕组的感抗（电抗）比主绕组的小，直流电阻较主绕组大。如让启动绕组采用线径细的线圈绕制，这样在通上相同的交流电时，启动绕组的电流比主绕组的电流超前，两绕组就会产生旋转的磁场驱动转子运转。 电阻分相单相异步电动机的启动转矩较小，一般为额定转矩的 1.2～2 倍，但启动电流较大，电冰箱的压缩机常采用这种类型的电动机。
电容分相启动单相异步电动机	**电容分相启动单相异步电动机是指在启动绕组回路串接电容器和启动开关，并且转子运转后断开启动绕组的单相异步电动机。** 电容分相启动单相异步电动机的外形与接线如图 2 所示。  （a）外形　（b）接线 图 2　电容分相启动单相异步电动机的外形与接线 从图 2（b）接线图可以看出，电容分相启动单相异步电动机的启动绕组串接有电容器和启动开关。在启动时启动开关闭合，启动绕组有电流通过，因为电容对电流具有超前移相作用，启动绕组的电流相位超前主绕组电流的相位，不同相位的电流通过空间位置相差 90° 的两绕组，两绕组产生旋转磁场驱动转子运转。电动机运转后，启动开关自动断开，断开启动绕组与电源的连接，转子由主绕组单独驱动运转。 电容分相启动单相异步电动机的启动转矩大、启动电流小，适用于各种满载启动的机械设备，如木工机械、空气压缩机等。
电容分相运行单相异步电动机	**电容分相运行单相异步电动机是指在启动绕组回路串接电容器，转子运转后启动绕组仍参与运行驱动的单相异步电动机。** 电容分相运行单相异步电动机的外形与接线如图 3 所示。从接线图可以看出，电容分相运行单相异步电动机的启动绕组串接有电容器。在启动时启动绕组有电流通过，电动机运转后，启动绕组仍与电源的连接，转子由主绕组和启动绕组共同驱动运转。由于电动机运行时启动绕组始终工作，因此启动绕组需要与主绕组一样采用较粗的导线绕制。  （a）外形　（b）接线 图 3　电容分相运行单相异步电动机的外形与接线 电容分相运行单相异步电动机具有结构简单、工作可靠、价格低、运行性能好等优点，但启动性能较差，广泛用在洗衣机、电风扇等设备中。

续表

类型	说　　明
电容分相启动运行单相异步电动机	**电容分相启动运行单相异步电动机是指启动绕组回路串接电容器，转子运转后启动绕组仍参与运行驱动的单相异步电动机。** 电容分相启动运行单相异步电动机的外形与接线如图 4 所示。从接线图可以看出，电容分相运行单相异步电动机的启动绕组接有两个电容器。在启动时启动开关闭合，C_1、C_2 均接入电路，当电动机转速达到一定值时，启动开关断开，容量大的 C_2 被切断，容量小的 C_1 仍与启动绕组连接，保证电动机有良好的运行性能。  （a）外形　　（b）接线 图 4　电容分相启动运行单相异步电动机的外形与接线 电容分相启动运行单相异步电动机结构较复杂，但启动、运行性能都比较好，主要用在启动转矩大的设备中，如水泵、空调、电冰箱和小型机床中。

8.3.2　罩极式单相异步电动机

罩极式单相异步电动机是一种结构简单无启动绕组的电动机，它分为隐极式和凸极式两种，两者的工作原理基本相同，其中凸极式应用更为广泛。本节主要介绍凸极式罩极单相异步电动机。

1. 外形

罩极式单相异步电动机的外形如图 8-20 所示。



图 8-20　罩极式单相异步电动机外形

2. 结构与原理

罩极式单相异步电动机以凸极式最为常用，凸极式又可分为单独励磁式和集中励磁式两

种，其结构如图 8-21 所示。

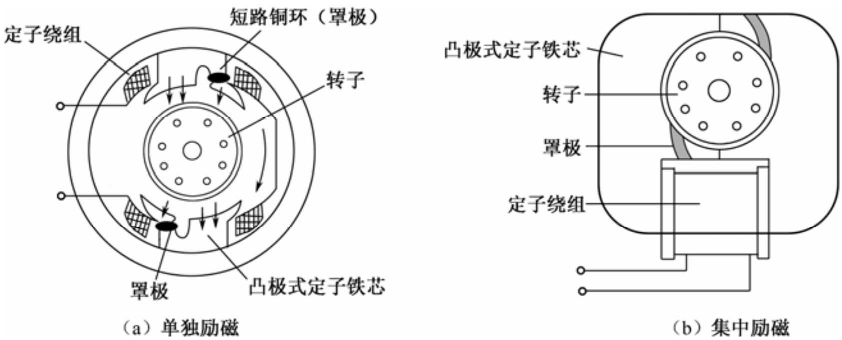


图 8-21　凸极式罩极单相异步电动机

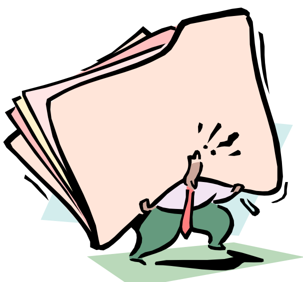
如图 8-21（a）所示为单独励磁式罩极单相异步电动机。该形式电动机的定子绕组绕在凸极式定子铁芯上，在定子铁芯每个磁极的 1/4～1/3 处开有小槽，将每个磁极分成两部分，并在较小部分磁极套有铜制的短路环（又称为罩极）。当定子绕组通电时，绕组产生的磁场经铁芯磁极分成两部分，由于短路环的作用，套有短路环铁芯通过的磁场与无短路环的铁芯通过的磁场不同，两磁场类似于分相式异步电动机主绕组和启动绕组产生的磁场，两磁场形成旋转磁场并作用于转子，转子就运转起来。

如图 8-21（b）所示为集中励磁式罩极单相异步电动机。该形式电动机的定子绕组集中绕在一起，定子铁芯分成两大部分，在每个大部分又分成一大一小两部分，在小部分铁芯上套有短路环（罩极）。当定子绕组通电时，绕组产生的磁场通过铁芯，由于短路环的作用，套有短路环铁芯通过的磁场与无短路环的铁芯通过的磁场不同，这种磁场形成旋转磁场会驱动转子运转。

罩极式单相异步电动机结构简单、成本低廉、运行噪声小，但启动和运行性能差，主要用在小功率空载或轻载启动的设备中，如小型风扇。

第 9 章

三相异步电动机的控制线路



问：老师，能否简单介绍一下三相异步电动机的控制线路呢？



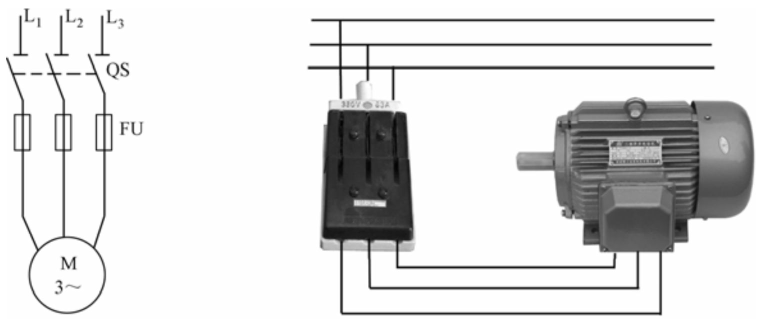
答：大多数工业机械设备采用三相异步电动机作为动力源。

要使电动机正常工作，除了要给它提供三相交流电外，还要根据实际情况对电动机进行各种控制和保护，这些都由三相异步电动机的控制线路来完成。

9.1 正转控制线路

9.1.1 简单的正转控制线路

正转控制线路是电动机最基本的控制线路，控制线路除了要为电动机提供电源外，还要对电动机进行启动 / 停止控制，另外在电动机过载时还能进行保护。对于一些要求不高的小容量电动机，可采用如图 9-1 所示简单的电动机正转控制线路，图 9-1（a）为电路图，图 9-1（b）为实物连接图。



（a）电路图　　（b）实物连接图

图 9-1　简单的电动机正转控制线路

电动机的三根相线通过闸刀开关内部的熔断器 FU 和触点连接到三相交流电，当合上闸刀开关 QS 时，三相交流电通过触点、熔断器送给三相电动机，电动机运转，当断开 QS 时，切断电动机供电，电动机停转。如果流过电动机的电流过大，熔断器 FU 因大电流流过而熔断，切断电动机供电，电动机得到了保护。为了安全起见，图中的闸刀开关可安装在配电箱内或绝缘板上。

这种控制线路简单、元件少，适合用做容量小且启动不频繁的电动机正转控制线路，图中的闸刀开关还可以用铁壳开关（封闭式负荷开关）、组合开关或低压断路器来代替。

9.1.2 点动正转控制线路

1. 电路原理

点动正转控制线路如图 9-2 所示。该线路由主线路和控制线路两部分构成，其中主线路由电源开关 QS、熔断器 FU_1 和交流接触器三个 KM 主触点和电动机组成，控制线路由熔断器 FU_2、按钮开关 SB 和接触器 KM 线圈组成。

当合上电源开关 QS 时，由于接触器三个 KM 主触点处于断开状态，电源无法加给电动机，电动机不工作。若按下按钮开关 SB，L_1、L_2 两相电压加到接触器 KM 线圈两端，有电流流过 KM 线圈，线圈产生磁场吸合接触器 KM 在主电路中三个主触点（常开触点），使三个主触点闭合，三相交流电源 L_1、L_2、L_3 通过 QS、FU 和接触器 KM 三个主触点给电动机供电，电动

机运转。此时，若松开按钮开关 SB，SB 断开，无电流通过接触器 KM 线圈，线圈无法吸合三个主触点，三个主触点断开，电动机停止运转。

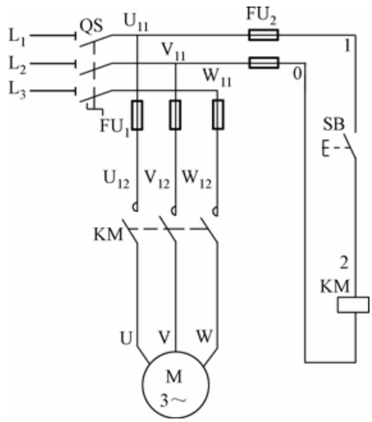


图 9-2　点动正转控制线路

线路的工作过程也可用下面的流程图来表示：

① 合上电源开关 QS。

② 启动过程。按下按钮 SB→接触器 KM 线圈得电→KM 主触点闭合→电动机 M 得电运转。

③ 停止过程。松开按钮 SB→接触器 KM 线圈失电→KM 主触点断开→电动机失电停转。

④ 停止使用时，应断开电源开关 QS。

在该线路中，按下按钮开关时，电动机运转，松开按钮时，电动机停止运转，这种线路称做点动式控制线路。

2. 控制线路安装

在制作如图 9-2 所示的控制线路时，先要根据实际情况选择好线路中的各个元件，图 9-3 就是控制线路所需的各个元件。元件选好后，再画出线路中各元件在配电板上布置图，如图 9-4 所示。布置图画好后，接着画出各元件的接线图，画接线图时各元件的连接要与原理图一致，接线图如图 9-5 所示。



图 9-3　控制线路所需的元件

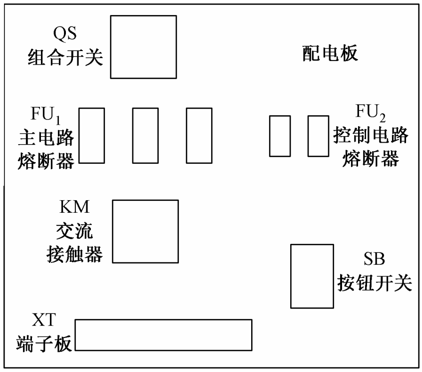


图 9-4　元件在配电板上的布置图

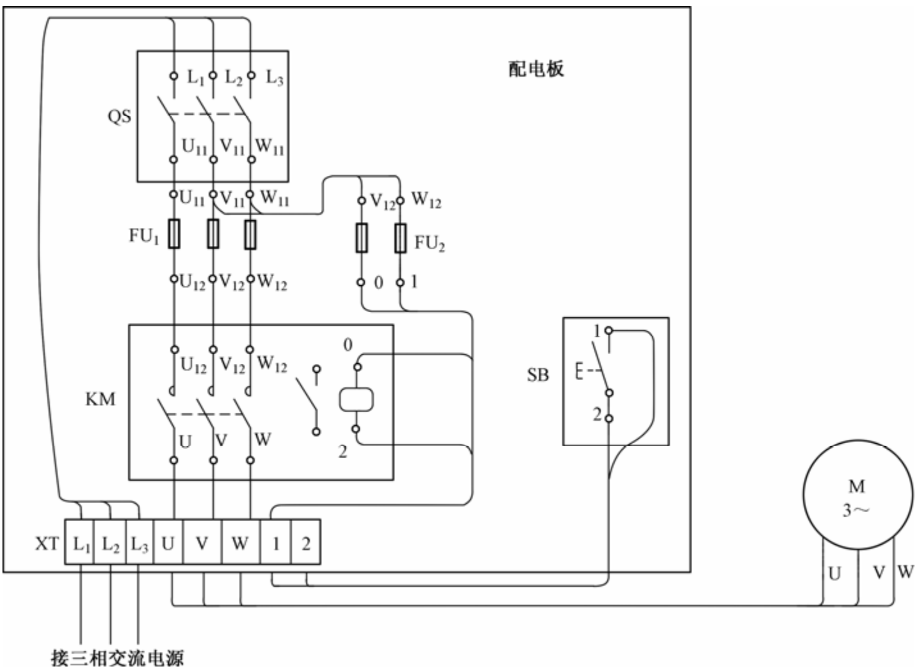


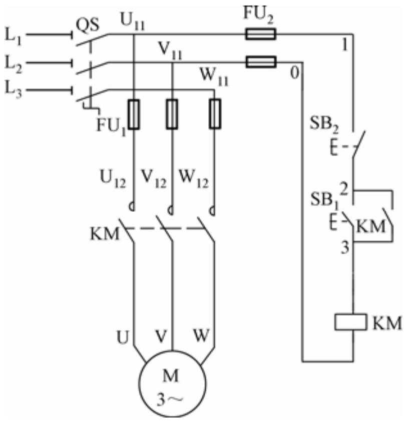
图 9-5　元件在配电板上的接线图

接线图画好后，就可以开始安装控制线路了。在安装控制线路时，先检测各个元件是否正常，然后按布置图将各个元件用螺钉固定在配电板上，再按接线图用导线将各元件连接起来，最后通电试车。

9.1.3　自锁正转控制线路

点动正转控制线路适用于电动机短时间运行控制，如果用做长时间运行控制极为不便（需一直按住按钮不放）。**电动机长时间连续运行常采用自锁正转控制线路。**自锁正转控制线路说明见表 9-1。

表 9-1　自锁正转控制线路说明

关键点	说　　明
电路图	 图 1　自锁正转控制线路
电路说明	从图 1 可以看出，该电路是在点动正转电路的控制电路中多串接一个常闭按钮 SB2，并在启动按钮 SB1 两端并联一个常开辅助触点 KM（又称自锁触点）。 自锁正转控制电路除了有长时间运行锁定功能外，还能实现欠压和失压保护功能。 1. 工作原理 **电路工作原理如下：** **①合上电源开关 QS。** **②启动过程。**按下常开启动按钮 SB_1→L_1、L_2 两相电压通过 QS、FU_2、SB_2、SB_1 加到接触器 KM 线圈两端→KM 线圈得电吸合 KM 主触点和常开辅助触点 KM→L_1、L_2、L_3 三相电压通过 QS、FU_1 和闭合的 KM 主触点提供给电动机→电动机 M 得电运转。 **③运行自锁过程。**在按下 SB_1 时，接触器 KM 线圈得电，KM 主触点和自锁触点闭合，主触点闭合使电动机得电运转，而 KM 自锁触点闭合使按钮 SB_1 松开（SB_1 断开）后 KM 线圈仍可继续得电，KM 主触点仍保持闭合→电动机继续运转。 **④停转控制。**按下常闭停止按钮 SB_2→KM 线圈失电→KM 主触点和常开辅助触点均断开→电动机 M 失电停转。 **⑤断开电源开关 QS。** 2. 欠压保护 **欠压保护是指当电源电压偏低（一般低于 85%）时切断电动机的供电，让电动机停止运转。**欠压保护过程分析如下： 电源电压偏低→L_1、L_2 两相间的电压偏低→接触器 KM 线圈两端电压偏低，产生的吸合力小，不足以继续吸合 KM 主触点和自锁触点→主触点和自锁触点均断开→电动机供电被切断而停转。 3. 失压保护 **失压保护是指当电源电压消失时切断电动机的供电途径，并保证在重新供电时无法自行启动。**失压保护过程分析如下： 电源电压消失→L_1、L_2 两相间的电压消失→KM 线圈失电→主触点和自锁触点断开→电动机供电被切断。在重新供电后，由于主触点和自锁触点均已断开，并且常开启动按钮 SB_1 也处于断开状态，故线路不会自动为电动机供电。

9.1.4　带过载保护的自锁正转控制线路

普通的自锁控制线路可以实现启动自锁和欠压、失压保护，但在电动机长时间过载运行时无法执行保护控制。当电动机过载运行时流过的电流偏大，长时间运行会使绕组温度升高，轻则绕组绝缘性能下降，重则烧坏。虽然在主电路中串有熔断器，但由于电动机启动时电流很大，为避免启动时熔断器被烧坏，熔断器的额定电流值选择较大，为电动机的 1.5～2.5 倍，熔断器只能在电动机短路时熔断保护，在电动机过载时无法熔断保护，因为过载电流一般小于熔断器额定电流。

带过载保护的自锁正转控制线路在普通的自锁控制线路基础上增加了过载保护元件，带过载保护的自锁正转控制线路说明见表 9-2 。

表 9-2　带过载保护的自锁正转控制线路说明

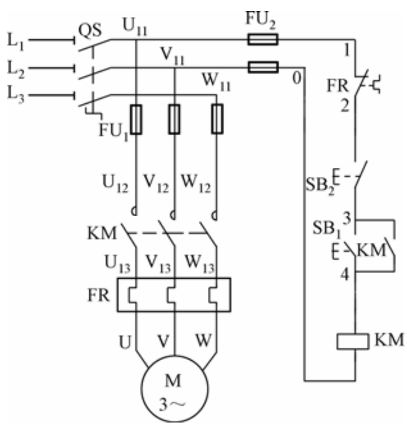
<table>
<tr><th>关键点</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td>线路图</td><td>

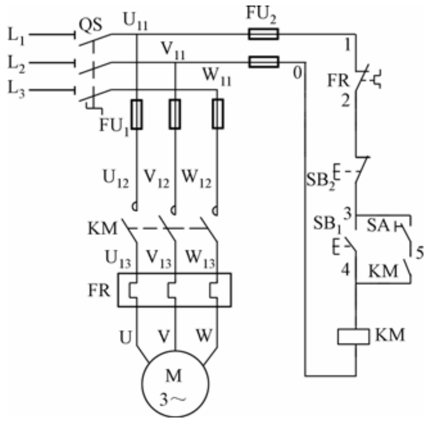
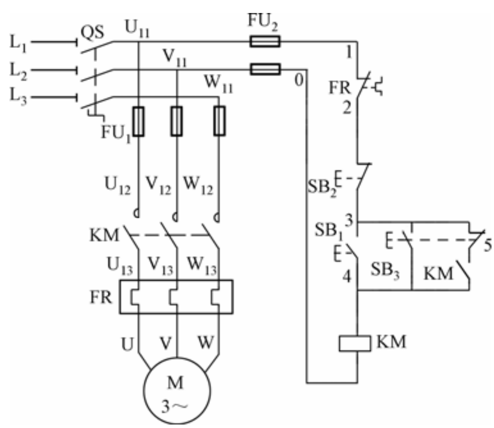
图 1　带过载保护的自锁正转控制线路</td></tr>
<tr><td>线路说明</td><td>从图 1 可以看出，电路中增加了一个热继电器 FR，其发热元件串接在主电路中，常闭触点串接在控制电路中。当电动机长时间过载运行时，因热继电器的发热元件流过的电流长时间偏大，发热元件（通常为双金属片）因发热而弯曲，通过传动机构将 FR 常闭触点断开，控制电路被切断，接触器 KM 线圈失电，主电路中的 KM 主触点断开，电动机供电被切断而停转。
热继电器只能执行过载保护，不能执行短路保护，这是因为短路时电流虽然很大，但热继电器发热元件温度升高到弯曲需要一定的时间，等到它动作时电动机和供电线路可能已被过大的短路电流烧坏。另外，当电路过载保护后，如果排除过载因素后，需要等待一定的时间让发热元件冷却复位，再重新启动电动机工作。</td></tr>
</table>

9.1.5　连续与点动混合控制线路

连续与点动混合控制线路是一种既能进行点动控制，又可以实现连续运行控制的电动机控制线路。实现连续与点动混合控制方式很多，这里介绍两种常用的连续与点动混合控制线路。

连续与点动混合控制线路说明见表 9-3。

表 9-3　连续与点动混合控制线路说明

类型	说　　明
连续与点动混合控制线路一	图 1 是一种连续与点动混合控制线路。  图 1　连续与点动混合控制线路一 从图 1 可以看出，该电路是在带过载保护的自锁正转控制电路的自锁电路中串接一个手动开关 SA。电路工作在点动方式还是连续方式，由手动开关 SA 来决定。 **当手动开关 SA 断开时，电路工作在点动控制方式。**工作过程分析如下： 按下启动按钮 SB1→接触器 KM 线圈得电→KM 主触点闭合→电动机得电运转；松开按钮 SB1→KM 线圈失电→KM 主触点断开→电动机失电停止运转。 **当手动开关 SA 闭合时，电路工作在连续控制方式。**工作过程分析如下： 按下启动按钮 SB_1→接触器 KM 线圈得电→KM 主触点和常开辅助触点（即自锁触点）均闭合→电动机得电运转；松开按钮 SB_1→KM 线圈依靠 SA 和 KM 常开辅助触点供电→KM 主触点仍保持闭合→电动机继续运转；按下常闭停止按钮 SB_2→KM 线圈失电→KM 主触点、常开辅助触点均断开→电动机失电停止运转。
连续与点动混合控制线路二	图 2 是另一种形式的连续与点动混合控制线路。  图 2 连续与点动混合控制线路二

续表

类型	说　　明
	从图 2 可以看出，该电路是在带过载保护的自锁正转控制电路的中增加了一个复合按钮开关 SB_3。电路工作在点动方式还是连续方式，由复合按钮 SB_3 来决定。 **（1）未操作 SB_3 时，电路工作在连续控制方式。**工作过程分析如下： 按下启动按钮 SB_1→接触器 KM 线圈得电→KM 主触点、常开辅助触点均闭合→电动机得电运转；松开按钮 SB_1→KM 线圈依靠 SB_3 常闭触点和已闭合的 KM 常开辅助触点供电→KM 主触点仍保持闭合→电动机继续运转。 **（2）按下 SB_3 时，电路工作在点动控制方式。**工作过程分析如下： 按下按钮 SB_3→SB_3 的常开触点闭合、常闭触点断开→接触器 KM 线圈得电→KM 主触点、常开辅助触点均闭合→电动机得电运转；松开按钮 SB_3→SB_3 的常开触点断开、常闭触点闭合→接触器 KM 线圈因 SB_3 的常开触点断开而失电→KM 主触点、常开辅助触点均断电→电动机停止运转。

9.2 正、反转控制线路

正转控制线路只能控制电动机往一个方向运转，而正、反转控制电路可以实现电动机正、反向运转控制。实现正、反转控制的方式很多，这里介绍四种常见的正、反转控制线路。

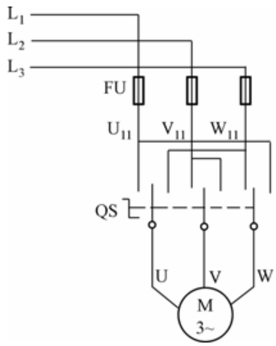
9.2.1 倒顺开关正、反转控制线路

倒顺开关正、反转控制线路采用倒顺开关对电动机进行正、反转控制。倒顺开关正、反转控制线路说明见表 9-4。

表 9-4　倒顺开关正、反转控制线路说明

关键点	说　　明
倒顺开关	倒顺开关如图 1 所示。  图 1　倒顺开关 从图 1 可以看出，倒顺开关有“顺、停、倒”三个挡位，开关旋至“顺”挡时控制电动机正转，开关旋至“停”挡时控制电动机停转，开关旋至“倒”挡时控制电动机反转。当倒顺开关处于“顺”挡时电动机正转，如果要控制电动机反转，应先将开关旋至“停”挡并停留一定的时间，让电动机停转，再将开关旋至“倒”挡，让电动机反转，如果旋至“停”挡不停留，直接旋至“倒”挡，未停转的电动机会因电流方向突然变反而容易损坏。

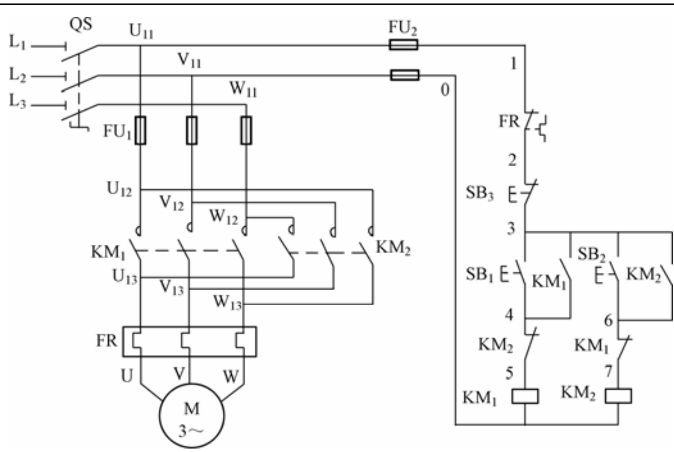
续表

关键点	说　　明
倒顺开关正、反转控制线路	倒顺开关正、反转控制线路如图 2 所示。  图 2　倒顺开关正、反转控制线路 在图 2 中，倒顺开关 QS 处于“停”挡，电动机无供电而停转。当 QS 旋至“顺”挡时，三个动触点与对应的左静触点接触，L_1、L_2、L_3 三相电压分别送到电动机的 U、V、W 相线，电动机正转。当 QS 旋至“倒”挡时，三个动触点与对应的右静触点接触，L_1、L_2、L_3 三相电压分别送到电动机的 W、V、U 相线，电动机 U、W 两相电压切换，电动机反转。 利用倒顺开关组成的正、反向控制电路采用的元件少、线路简单，但由于倒顺开关直接接在主电路中，操作不安全，也不适合用做大容量的电动机控制，一般用在额定电流为 10A、额定功率为 3kW 以下的小容量电动机控制线路中。

9.2.2　接触器连锁正、反转控制线路

接触器连锁正、反转控制线路的主电路中连接了两个接触器，正、反转操作元件放置在控制电路中，故工作安全可靠。接触器连锁正、反转控制线路说明见表 9-5。

表 9-5　接触器连锁正、反转控制线路说明

关键点	说　　明
线路图	 图 1　接触器连锁正、反转控制线路

续表

关键点	说　　明
线路说明	在图 1 主电路中连接了接触器 KM_1 和接触器 KM_2，两个接触器主触点连接方式不同，KM_1 按 L_1-U、L_2-V、L_3-W 方式连接，KM_2 按 L_1-W、L_2-V、L_3-U 方式连接。 在工作时，接触器 KM_1、KM_2 的主触点严禁同时闭合，否则会造成 L_1、L_3 两相电源直接短路，为了避免 KM_1、KM_2 主触点同时得电闭合，分别给各自的线圈串接了对方的常闭辅助触点，如给 KM_1 线圈串接了 KM_2 常闭辅助触点，给 KM_2 线圈串接了 KM_1 常闭辅助触点。当一个接触器的线圈得电时会使自己主触点闭合，还会使自己的常闭触点断开，这样另一个接触器线圈就无法得电。接触器这种相互制约称为接触器的连锁（也称互锁），实现连锁的常闭辅助触点称为连锁触点。 **电路工作原理分析如下：** **（1）闭合电源开关 QS。** **（2）正转控制过程。** **①正转连锁控制。**按下正转按钮 SB_1→KM_1 线圈得电→KM_1 主触点闭合、KM_1 常开辅助触点闭合、KM_1 常闭辅助触点断开→ KM_1 主触点闭合将 L_1、L_2、L_3 三相电源分别供给电动机 U、V、W 端，电动机正转；KM_1 常开辅助触点闭合使得 SB_1 松开后 KM_1 线圈继续得电，实现接触器 KM_1 自锁；KM_1 常闭辅助触点断开切断 KM_2 线圈的供电，使 KM_2 主触点无法闭合，实现 KM_1、KM_2 之间的连锁。 **②停止控制过程。**按下停转按钮 SB_3→KM_1 线圈失电→KM_1 主触点断开、KM_1 常开辅助触点断开、KM_1 常闭辅助触点闭合→KM_1 主触点断开使电动机失电而停转。 **（3）反转控制过程。** **①反转连锁控制。**按下反转按钮 SB_2→KM_2 线圈得电→KM_2 主触点闭合、KM_2 常开辅助触点闭合、KM_2 常闭辅助触点断开→ KM_2 主触点闭合将 L_1、L_2、L_3 三相电源分别供给电动机 W、V、U 端，电动机反转；KM_2 常开辅助触点闭合，使得 SB_2 松开后 KM_2 线圈继续得电；KM_2 常闭辅助触点断开切断 KM_1 线圈的供电，使 KM_1 主触点无法闭合，实现 KM_1、KM_2 之间的连锁。 **③停止控制。**按下停转按钮 SB_3→KM_2 线圈失电→KM_2 主触点断开、KM_2 常开辅助触点断开、KM_2 常闭辅助触点闭合→KM_2 主触点断开使电动机失电而停转。 **（4）断开电源开关 QS。** 对于接触器连锁正、反转控制线路，若将电动机由正转变为反转，需要先按下停止按钮让电动机停转，同时让接触器各触点复位，再按反转按钮让电动机反转，如果在正转时不按停止按钮，而直接按反转按钮，由于连锁的原因，反转接触器线圈无法得电而使控制无效。

9.2.3　按钮连锁正、反转控制线路

接触器连锁正、反转控制线路在控制电动机由正转转为反转时，需要先按停止按钮，再按反转按钮，这样操作较为不便，采用按钮连锁正、反转控制线路则可避免这种不便。按钮连锁正、反转控制线路说明见表 9-6。

表 9-6　按钮连锁正、反转控制线路说明

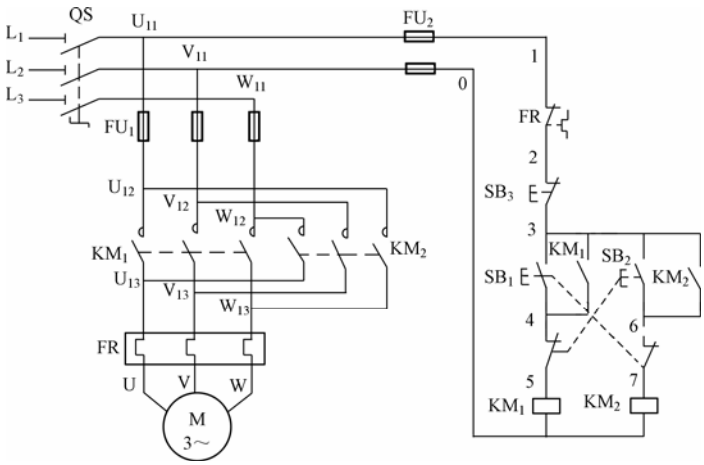
<table>
<tr><th>关键点</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td>线路图</td><td>


图 1　按钮连锁正、反转控制线路
</td></tr>
<tr><td>线路说明</td><td>
从图 1 可以看出，电路采用两个复合按钮 SB_1 和 SB_2，其中复合按钮 SB_1 代替接触器连锁正、反转控制线路中的正转按钮和反转接触器的常闭辅助触点，另一个复合按钮代替反转按钮和正转接触器的常闭辅助触点。
电路工作原理分析如下：
①闭合电源开关 QS。
②正转控制。按下正转复合按钮 SB_1→SB_1 常开触点闭合、常闭触点断开→SB_1 常开触点闭合使接触器 KM_1 线圈得电，KM_1 主触点和常开辅助触点均闭合，KM_1 主触点闭合使电动机正转，KM_1 常开辅助触点闭合使 KM_1 接触器自锁；而 SB_1 常闭触点断开，使接触器 KM_2 线圈无法得电，从而保证 KM_1、KM_2 两接触器主触点不会同时闭合。
松开 SB_1 后，SB_1 常开触点断开、常闭触点闭合，依靠 KM_1 常开辅助触点的自锁，让 KM_1 线圈维持得电，KM_1 主触点仍处于闭合状态，电动机维持正转。
③反转控制。在电动机处于正转时，按下反转复合按钮 SB_2→SB_2 常开触点闭合、常闭触点断开→SB_2 常闭触点断开，使接触器 KM_1 线圈失电，KM_1 主触点和常开辅助触点均断开，电动机失电；SB_2 常开触点闭合，使接触器 KM_2 线圈得电，KM_2 主触点和常开辅助触点均闭合，KM_2 主触点闭合使电动机反转，KM_2 常开辅助触点闭合，实现自锁（在松开 SB_2 后让 KM_2 线圈能继续得电）。
松开 SB_2 后，SB_2 常开触点断开、常闭触点闭合，依靠 KM_2 常开辅助触点的自锁，让 KM_2 线圈维持得电，KM_2 主触点仍处于闭合状态，电动机维持正转。
④停转控制。按下停转按钮 SB_3→控制电路供电被切断→KM_1、KM_2 线圈均失电→KM_1、KM_2 主触点均断开→电动机停转。
⑤断开电源开关 QS。
由于按钮连锁正、反转控制线路由正转转为反转时无须进行停止控制，故具有操作方便的优点，但这种电路容易因复合按钮故障造成两相电源短路。
</td></tr>
</table>

续表

<table>
<tr><th>关键点</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td></td><td>复合按钮结构如图 2 所示，在按下复合按钮时，正常应是常闭触点先断开，然后才是常开触点闭合，在松开复合按钮，正常应是常开触点先断开，然后才是常闭触点闭合。如果复合按钮出现问题，按下按钮时常闭触点未能及时断开（如常闭触点与动触点产生粘连），而常开触点又闭合，这样两个触点都处于接通状态，会导致两个接触器的线圈都会得电，如图 9-13 所示的反转按钮 SB_2 出现故障，在电动机正转时按下 SB_2，SB_2 常闭触点未能及时断开，而常开触点已闭合，这样 KM_1 线圈、KM_2 都会得电，KM_1、KM_2 的主触点均闭合，就会出现两相电源直接短路。

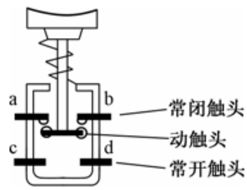


图 2　复合按钮结构</td></tr>
</table>

9.2.4　按钮、接触器双重连锁正、反转控制线路

按钮、接触器双重连锁正反转控制线路可以有效解决按钮连锁正反转控制线路容易出现两相电源短路的问题。按钮、接触器双重连锁正反转控制线路说明见表 9-7。

表 9-7　按钮、接触器双重连锁正反转控制线路说明

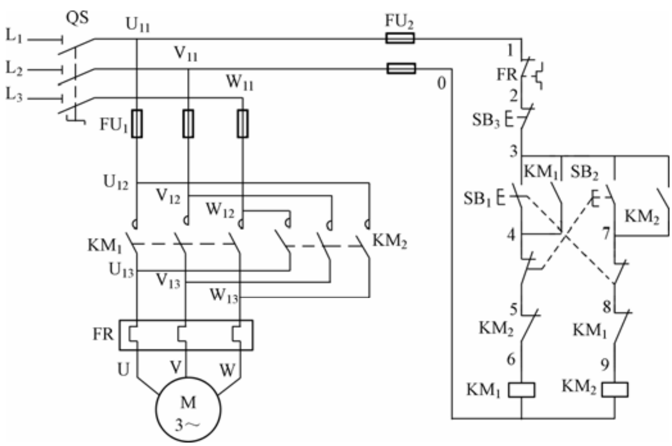
<table>
<tr><th>关键点</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td>线路图</td><td>

图 1　按钮、接触器双重连锁正、反转控制线路</td></tr>
<tr><td>线路说明</td><td>从图 1 可以看出，按钮、接触器双重连锁正反转控制线路是在按钮连锁正反转控制线路的基础上，将两个接触器各自的常闭辅助触点与对方的线圈串接在一起，这样就实现了按钮连锁和接触器连锁的双重保护。
电路工作原理分析如下：
①闭合电源开关 QS。
②正转控制。按下正转复合按钮 SB_1→SB_1 常开触点闭合、常闭触点断开→SB_1 常开触点闭合使接触器 KM_1 线圈得电→KM_1 主触点、常开辅助触点闭合，KM_1 常闭辅助触点断开→KM_1 主触点闭合使电动机正转，KM_1 常开辅助触点闭合，使 KM_1 接触器自锁，KM_1 常闭辅助触点断开与断开的 SB_1 常闭触点双重切断 KM_2 线圈供电，使 KM_2 线圈无法得电。</td></tr>
</table>

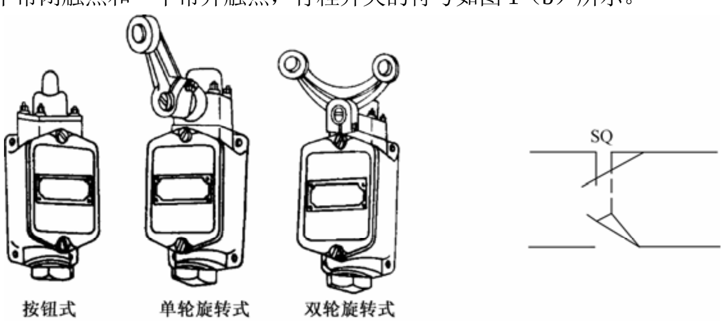
续表

关键点	说　　明
	松开 SB_1 后，SB_1 常开触点断开、常闭触点闭合，依靠 KM_1 常开辅助触点的自锁，让 KM_1 线圈维持得电，KM_1 主触点仍处于闭合，电动机维持正转。 **③反转控制。**在电动机处于正转时，按下反转按钮 SB_2→SB_2 常开触点闭合、常闭触点断开→SB_2 常闭触点断开，使接触器 KM_1 线圈失电，KM_1 主触点、常开辅助触点均断开，电动机失电；SB_2 常开触点闭合使接触器 KM_2 线圈得电，KM_2 主触点、常开辅助触点均闭合，KM_2 常闭触点断开，KM_2 主触点闭合，使电动机反转，KM_2 常开辅助触点闭合，实现自锁，KM_2 常闭触点断开，与断开的 SB_2 常闭触点双重切断 KM_1 线圈供电。 松开 SB_2 后，SB_2 常开触点断开、常闭触点闭合，依靠 KM_2 常开辅助触点的自锁，让 KM_2 线圈维持得电，KM_2 主触点仍处于闭合，电动机维持正转。 **④停转控制。**按下停转按钮 SB_3→控制电路供电切断→KM_1、KM_2 线圈均失电→KM_1、KM_2 主触点均断开→电动机停转。 **⑤断开电源开关 QS。** 按钮、接触器双重连锁正反转控制线路有与按钮连锁正反转控制线路一样的操作方便性，又因为采用了按钮和接触器双重连锁，故工作安全可靠。

9.3 限位控制线路

一些机械设备（如车床）的运动部件是由电动机来驱动的，它们在工作时并不都是一直往前运动，而是运动到一定的位置自动停止，然后自动或由操作人员操作使之返回。为了实现这种控制效果，需要给电动机安装限位控制线路。限位控制线路说明见表 9-8。

表 9-8　限位控制线路说明

关键点	说　　明
行程开关	**限位控制线路又称位置控制线路或行程控制线路，它是利用位置开关来检测运动部件的位置，当运动部件运动到指定位置时，位置开关给控制线路发出指令，让电动机停转或反转。**常见的位置开关有行程开关和接近开关，其中行程开关使用更为广泛。 行程开关的外形如图 1（a）所示，它可分为按钮式、单轮旋转式和双轮旋转式等。行程开关内部一般有一个常闭触点和一个常开触点，行程开关的符号如图 1（b）所示。  （a）外形　　（b）符号 图 1　行程开关

续表

<table>
<tr><th>关键点</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td></td><td>

在使用时，行程开关通常安装在运动部件需要停止的位置，如图 2 所示，当运动部件行进到行程开关处时，挡铁会碰压行程开关，行程开关内的常闭触点断开、常开触点闭合，由于行程开关的两个触点接在控制线路上，它控制电动机停转，运动部件也就停止。如果需要运动部件反向运动，可操作控制线路中的反转按钮，当运动部件反向运动到另一个行程开关处时，会碰压该处的行程开关，行程开关通过控制线路让电动机停转，运动部件也就停止。

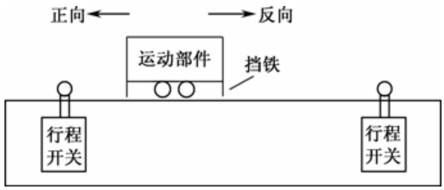


图 2　行程开关安装位置示意图

行程开关可分为自动复位和非自动复位两种。按钮式和单轮旋转式行程开关可以自动复位，当挡铁移开时，依靠内部的弹簧使触点自动复位；**双轮旋转式行程开关不能自动复位，**当挡铁从一个方向碰压其中一个滚轮时，内部触点动作，挡铁移开后内部触点不能复位，当挡铁反向运动（返回）时，碰压另一个滚轮，触点才能复位

</td></tr>
<tr><td>限位控制线路</td><td>

限位控制线路如图 3 所示。

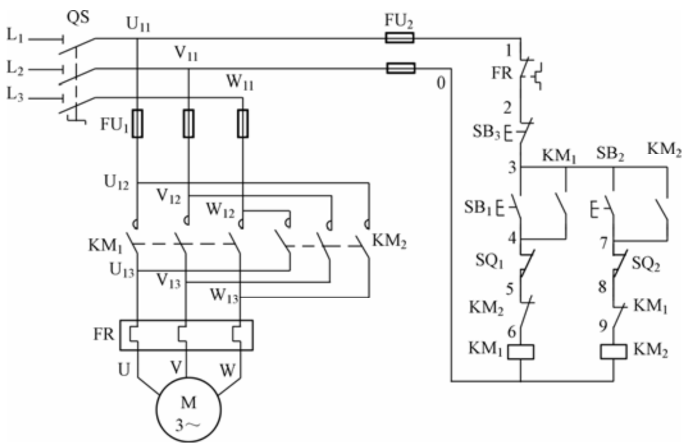


图 3　限位控制线路

从图 3 可以看出，限位控制线路是在接触器连锁正反转控制线路中串接两个行程开关 SQ_1、SQ_2 构成的。

电路工作原理分析如下：

（1）闭合电源开关 QS。

（2）正转控制过程。

①正转控制。按下正转按钮 SB_1→KM_1 线圈得电→KM_1 主触点闭合、KM_1 常开辅助触点闭合、KM_1 常闭辅助触点断开→ KM_1 主触点闭合，电动机得电正转，驱动运动部件正向运动；KM_1 常开辅助触点闭合，让 KM_1 线圈在 SB_1 断开时能继续得电（自锁）；KM_1 常闭辅助触点断开，使 KM_2 线圈的无法得电，实现 KM_1、KM_2 之间的连锁。

②正向限位控制。当电动机正转驱动运动部件运动到行程开关 SQ_1 处→SQ_1 常闭触点断开（常开触点未用）→KM_1 线圈失电→KM_1 主触点断开、KM_1 常开辅助触点断开、KM_1 常闭辅助触点闭合→KM_1 主触点断开，使电动机失电而停转→运动部件停止正向运动。

</td></tr>
</table>

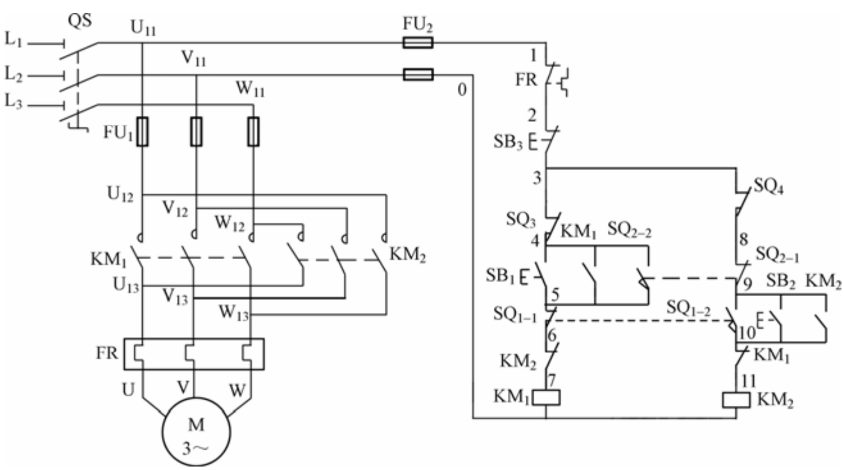
续表

关键点	说　　明
	（3）反转控制过程。 **①反转控制。**按下反转按钮 SB_2→KM_2 线圈得电→KM_2 主触点闭合、KM_2 常开辅助触点闭合、KM_2 常闭辅助触点断开→KM_2 主触点闭合，电动机得电反转，驱动运动部件反向运动；KM_2 常开辅助触点闭合， 锁定 KM_2 线圈得电；KM_2 常闭辅助触点断开，使 KM_1 线圈无法得电，实现 KM_1、KM_2 之间的连锁。 **③反向限位控制。**当电动机反转驱动运动部件运动到行程开关 SQ_2 处→SQ_2 常闭触点断开→KM_2 线圈失电→KM_2 主触点断开、KM_2 常开辅助触点断开、KM_2 常闭辅助触点闭合→KM_2 主触点断开，使电动机失电而停转→运动部件停止正向运动。 **（4）断开电源开关 QS。**

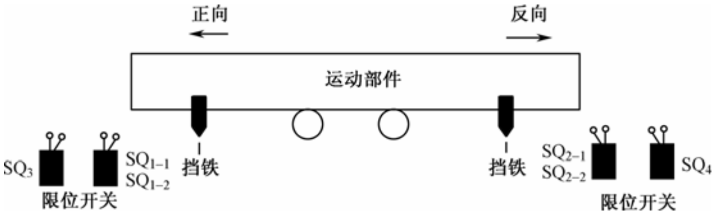
9.4 自动往返控制线路

有些生产机械设备在加工零件时，要求在一定的范围内能自动往返运动，即当运动部件运行到一定位置时不用人工操作按钮就能自动返回。对于这种情况，可给电动机安装自动往返控制线路。自动往返控制线路说明见表 9-9 。

表 9-9　自动往返控制线路说明

关键点	说　　明
线路图	 图 1　自动往返控制线路
线路说明	自动往返控制线路采用了 SQ_1～SQ_4 四个行程开关，四个行程开关的安装位置如图 2 所示。SQ_2、SQ_1 分别用来控制电动机正、反转，当运动部件运行到 SQ_2 处时，电动机由反转转为正转，运行到 SQ1 处时则由正转转为反转；SQ_3、SQ_4 用做终端保护，它们只用到了常闭触点，当 SQ_1、SQ_2 失效时它们可以让电动机停转进行保护，防止运动部件行程超出范围而发生安全事故。

续表

关键点	说　　明
	 图 2　自动往返控制线路 4 个行程开关的安装位置 **电路工作原理分析如下：** **（1）闭合电源开关 QS。** **（2）往返运行控制。** **①运转控制。**若启动时运动部件处于反向位置，按下正转按钮 SB_1→KM_1 线圈得电→KM_1 主触点闭合、KM_1 常开辅助触点闭合、KM_1 常闭辅助触点断开→ KM_1 主触点闭合，电动机得电正转，驱动运动部件正向运动；KM_1 常开辅助触点闭合，让 KM_1 线圈在 SB_1 断开时继续得电（自锁）；KM_1 常闭辅助触点断开，使 KM_2 线圈无法得电，实现 KM_1、KM_2 之间的连锁。 **②方向转换控制。**电动机正转带动运动部件运动并碰触行程开关 SQ_1→SQ_1 常闭触点 SQ_{1-1} 断开、常开触点 SQ_{1-2} 闭合→KM_1 线圈失电→KM_1 主触点断开、KM_1 常开辅助触点断开、KM_1 常闭辅助触点闭合→KM_1 主触点断开使电动机失电，KM_1 常开辅助触点断开，撤销自锁，闭合的 KM_1 常闭辅助触点与闭合的 SQ_{1-2} 为 KM_2 线圈供电→KM_2 主触点闭合、KM_2 常开辅助触点闭合、KM_2 常闭辅助触点断开→KM_2 主触点闭合，电动机得电反转，驱动运动部件反向运动；KM_2 常开辅助触点闭合，让 KM_2 线圈在 SB_2 断开时继续得电（自锁）；KM_2 常闭辅助触点断开，使 KM_1 线圈无法得电，实现 KM_2、KM_1 之间的连锁。 **③终端保护控制。**若行程开关 SQ_1 失效→运动部件碰触 SQ_1 时，常闭触点 SQ_{1-1} 仍闭合、常开触点 SQ_{1-2} 仍断开→电动机继续正转，带动运动部件碰触行程开关 SQ_3→SQ_3 常闭触点断开→KM_1 线圈供电切断→KM_1 主触点断开→电动机停转→运动部件停止运动。 若启动时运动部件处于正向位置，应按下反转按钮 SB_2，其工作原理与运动部件处于反向位置时按下正转按钮 SB_1 相同，这里不再叙述。 **（3）停止控制。**若需要停止运动部件的往返运行，可按下停止按钮 SB_3→KM_1、KM_2 线圈供电均被切断→KM_1、KM_2 主触点均断开→电动机失电停转→运动部件停止运行。 **（4）断开电源开关 QS。**

9.5 顺序控制线路

有一些机械设备安装有两个或两个以上的电动机，为了保证设备的正常工作，常常要求这些电动机按顺序进行启动，如只有在电动机 A 启动后，电动机 B 才能启动，否则机械设备工作容易出现问题。**顺序控制线路就是让多台电动机能按先后顺序工作的控制线路。**实现顺序控制的线路很多，下面介绍两种常用的顺序控制线路。顺序控制线路说明见表 9-10。

表 9-10　顺序控制线路说明

<table>
<tr><th>类型</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td>顺序控制线路一</td><td>

图 1 是一种常用的顺序控制线路。从图 1 可以看出，该电路采用了 KM_1、KM_2 两个接触器，KM_1、KM_2 的主触点属于串接关系，KM_2 主触点接在 KM_1 主触点的下方，在 KM_1 主触点断开时，KM_2 主触点闭合无效，也就是说，只有 KM_1 主触点先闭合让电动机 M_1 启动，然后 KM_2 主触点闭合才能让电动机 M_2 启动。

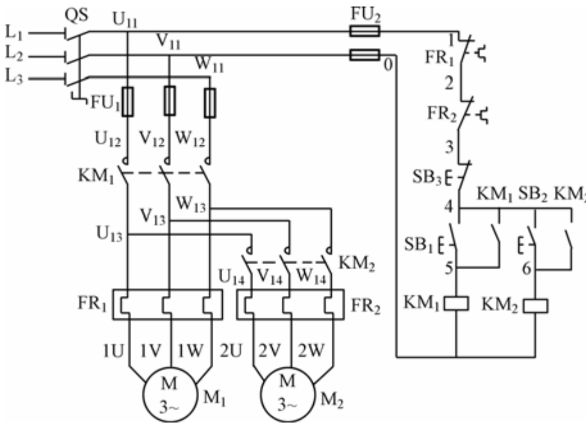


图 1　一种常用的顺序控制线路

电路工作原理分析如下：

①闭合电源开关 QS。

②电动机 M_1 的启动控制。按下电动机 M_1 启动按钮 SB_1→KM_1 线圈得电→KM_1 主触点闭合、KM_1 常开辅助触点闭合→KM_1 主触点闭合，电动机 M_1 得电运转；KM_1 常开辅助触点闭合，让 KM_1 线圈在 SB_1 断开时继续得电（自锁）。

③电动机 M_2 的启动控制。按下电动机 M_2 启动按钮 SB_2→KM_2 线圈得电→KM_2 主触点闭合、KM_2 常开辅助触点闭合→KM_2 主触点闭合，电动机 M_2 得电运转；KM_2 常开辅助触点闭合，让 KM_2 线圈在 SB_2 断开时继续得电。

④停转控制。按下停转按钮 SB_3→KM_1、KM_2 线圈均失电→KM_1、KM_2 主触点均断开→电动机 M_1、M_2 均失电停转。

⑤断开电源开关 QS。

</td></tr>
<tr><td>顺序控制线路二</td><td>

图 2 是另一种常用的顺序控制线路，从图中可以看出，该电路同样采用了 KM_1、KM_2 两个接触器，但 KM_1、KM_2 的主触点属于并接关系，为了让电动机 M_1、M_2 能按先后顺序启动，要求两个接触器的主触点先后闭合。

电路工作原理分析如下：

①闭合电源开关 QS。

②电动机 M_1 的启动控制。按下电动机 M_1 启动按钮 SB_1→KM_1 线圈得电→KM_1 主触点闭合、KM_1 常开辅助触点闭合→ KM_1 主触点闭合，电动机 M_1 得电运转；KM_1 常开辅助触点闭合，让 KM_1 线圈在 SB_1 断开时继续得电（自锁）。

③电动机 M_2 的启动控制。按下电动机 M_2 启动按钮→KM_2 线圈得电→KM_2 主触点闭合、KM_2 常开辅助触点闭合→KM_2 主触点闭合，电动机 M_2 得电运转；KM_2 常开辅助触点闭合，让 KM_2 线圈在 SB_2 断开时继续得电。

</td></tr>
</table>

续表

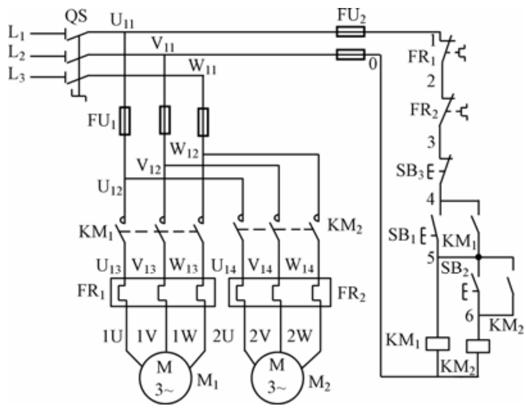
<table>
<tr><th>类型</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td></td><td>


图 2　另一种常用的顺序控制线路

④停转控制。按下停转按钮 SB_3→KM_1、KM_2 线圈均失电→KM_1、KM_2 主触点均断开→电动机 M_1、M_2 均失电停转。
⑤断开电源开关 QS。
在图 2 电路中，若先按下电动机 M_2 启动按钮，由于 SB_1 和 KM_1 常开辅助触点都是断开的，KM_2 线圈无法得电，KM_2 主触点无法闭合，故电动机 M_2 无法在电动机 M_1 前启动。
</td></tr>
</table>

9.6 多地控制线路

利用多地控制线路可以在多个地点操作同一台电动机的运行。多地控制线路说明见表 9-11。

表 9-11　多地控制线路说明

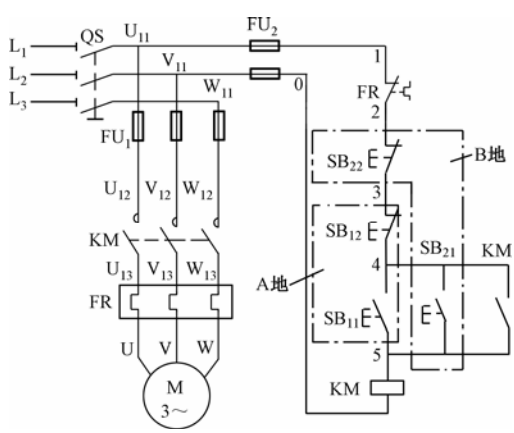
<table>
<tr><th>关键点</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td>线路图</td><td>


图 1　多地控制线路
</td></tr>
</table>

续表

关键点	说　明
线路说明	在图 1 中，SB_{11}、SB_{12} 分别为 A 地启动、停止按钮，安装在 A 地，SB_{21}、SB_{22} 分别为 B 地启动、停止按钮，安装在 B 地。 **电路工作原理分析如下：** **①闭合电源开关 QS。** **②A 地启动控制。**按下 A 地启动按钮 SB_{11}→KM 线圈得电→KM 主触点闭合、KM 常开辅助触点闭合→KM 主触点闭合，电动机得电运转；KM 常开辅助触点闭合，让 KM 线圈在 SB_{11} 断开时继续得电（自锁）。 **③A 地停止控制。**按下 A 地停止按钮 SB_{12}→KM 线圈失电→KM 主触点断开、KM_1 常开辅助触点断开→KM 主触点断开，电动机失电停转；KM 常开辅助触点断开，让 KM 线圈在 SB_{12} 复位闭合时无法得电。 **④B 地控制。**B 地启动与停止控制原理与 A 点相同。 **⑤断开电源开关 QS。** 图 1 实际上是一个两地控制线路，如果要实现三个或三个以上地点控制，只要将各地的启动按钮并接，将停止按钮串接即可。

9.7 降压启动控制线路

电动机在刚启动时，流过定子绕组的电流很大，为额定电流的 4～7 倍。对于容量大的电动机，若采用普通的全压启动方式，会出现启动时电流过大而使供电电源的电压下降很多，这样可能会影响同一供电的其他设备正常工作。

解决上述问题的方法就是对电动机进行降压启动，待电动机运转以后再提供全压。一般规定，供电电源容量在 180kW 以上，电动机容量在 7kW 以下的三相异步电动机可采用直接全压启动，超出这个范围需采用降压启动方式。另外，由于降压启动时流入电动机的电流较小，电动机产生的力矩小，故降压启动需要在轻载或空载时进行。

降压启动控制线路种类很多，常见的有定子绕组串接电阻降压启动、补偿器降压启动、星形－三角形降压启动和延边三角形降压启动。

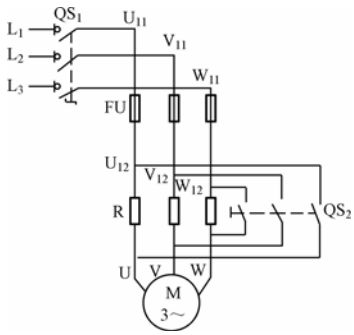
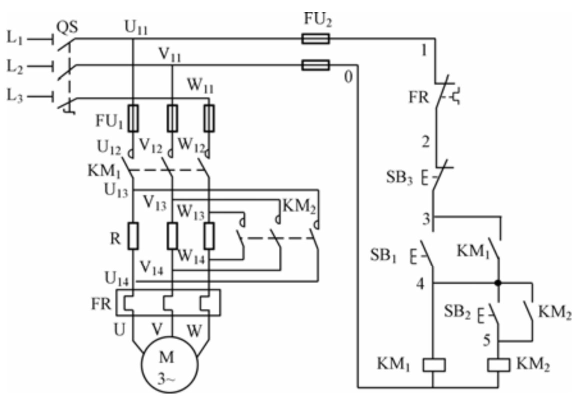
9.7.1　定子绕组串接电阻降压启动控制线路

定子绕组串接电阻降压启动原理是启动时在电动机定子绕组和电源之间串接电阻进行降压，电动机运转后再将电阻短接，给定子绕组提供全压。定子绕组串接电阻降压实现方式很多，表 9-12 介绍了三种定子绕组串接电阻降压启动控制线路。

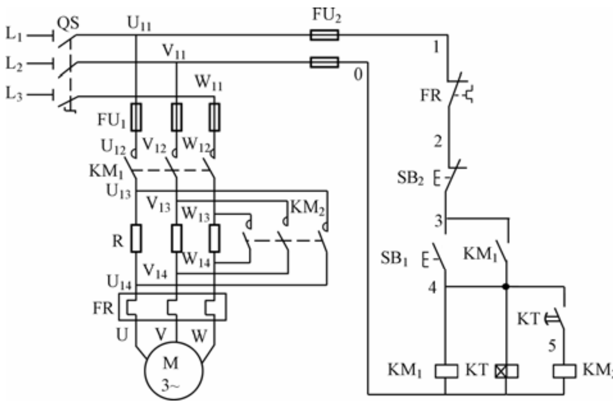
表 9-12　三种定子绕组串接电阻降压启动控制线路说明

类型	说　明
手动切换电阻控制线路	手动切换电阻控制线路如图 1 所示，它是在电源与电动机之间串接三个电阻，并在电阻两端并联转换开关。

续表

类型	说　　明
	 图 1　手动切换电阻控制线路 **电路工作原理分析如下：** **①闭合电源开关 QS_1。** **②降压启动。**电源经电阻 R 降压后为电动机供电，由于电阻的降压作用，送给电动机的电压较低，电动机降压启动。 **③全压供电。**电动机低压启动后，将转换开关 QS_2 闭合，电源直接经 QS_2 提供给电动机，电动机全压运行。 **④断开电源开关 QS1。**
按钮和接触器切换电阻控制线路	按钮和接触器切换电阻控制线路如图 2 所示。  图 2　按钮和接触器切换电阻控制线路 **电路工作原理分析如下：** **①闭合电源开关 QS。** **②降压启动。**按下按钮 SB_1→KM_1 线圈得电→KM_1 主触点闭合、KM_1 常开辅助触点闭合→KM_1 主触点闭合，电源经电阻 R 降压为电动机供电，电动机被降压启动；KM_1 常开辅助触点闭合，让 KM_1 线圈在 SB_1 断开时继续得电（自锁）。 **③全压供电。**按下按钮 SB_2→KM_2 线圈得电→KM_2 主触点闭合、KM_2 常开辅助触点闭合→ KM_2 主触点闭合，电源直接经 KM_2 主触点为电动机提供全压，电动机全压运行；KM_2 常开辅助触点闭合，让 KM_2 线圈在 SB_2 断开时继续得电（自锁）。 **④停止控制。**按下按钮 SB_3→KM_1 线圈、KM_2 均失电→KM_1、KM_2 主触点均断开→电动机供电被切断而停转。 **⑤断开电源开关 QS。**

续表

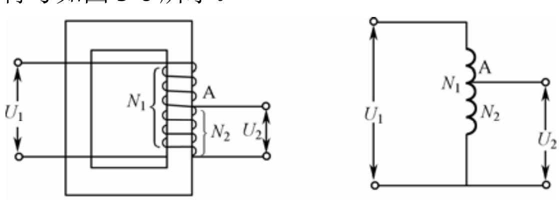
类型	说　　明
时间继电器切换电阻控制线路	时间继电器切换电阻控制线路如图 3 所示。  图 3　时间继电器切换电阻控制线路 **电路工作原理分析如下：** **①闭合电源开关 QS。** **②降压启动。**按下按钮 SB_1→接触器 KM_1 线圈和时间继电器 KT 线圈均得电→KM_1 线圈得电，使 KM_1 主触点闭合、KM_1 常开辅助触点闭合→ KM_1 主触点闭合，电源经电阻 R 降压为电动机供电，电动机降压启动；KM_1 常开辅助触点闭合，让 KM_1 线圈在 SB_1 断开时继续得电（自锁）。 **③全压供电。**电动机降压启动一段时间后，时间继电器线圈 KT 也得电一段时间→KT 延时闭合常开触点闭合→KM_2 线圈得电→KM_2 主触点闭合→电源直接经 KM_2 主触点为电动机提供全压，电动机全压运行。 **④停止控制。**按下按钮 SB_2→KM_1、KM_2、KT 线圈均失电→KM_1、KM_2 主触点均断开，KT 常开触点断开→电动机因供电被切断而停转。 **⑤断开电源开关 QS。**

9.7.2　自耦变压器降压启动控制线路

自耦变压器降压启动是利用自耦变压器能改变电压大小的特点，在启动电动机时让自耦变压器将电压降低供给电动机，启动完成后再将电压升高提供给电动机。

1. 自耦变压器

自耦变压器结构与符号如图 9-6 所示。



（a）结构　　（b）符号

图 9-6　自耦变压器结构与符号

从图 9-6 可以看出，自耦变压器只有一个绕组（匝数为 N_1），在绕组的中间部分（图中为 A 点）引出一个接线端，这样就将绕组的一部分当做二次绕组（匝数为 N_2）。自耦变压器工作原理与普通的变压器相同，也可以改变电压的大小，其规律同样可以用下列式子表示：

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{N_1}{N_2}=K$$

从式子可以看出，改变匝数 N_2 就可以调节输出电压 U_2 的大小，N_2 越少，U_2 电压越低。

图 9-6 为单相自耦变压器，电动机降压启动时常采用三相自耦变压器。用做电动机启动的三相自耦变压器又称自耦减压启动器或补偿器，其结构原理如图 9-7 所示。

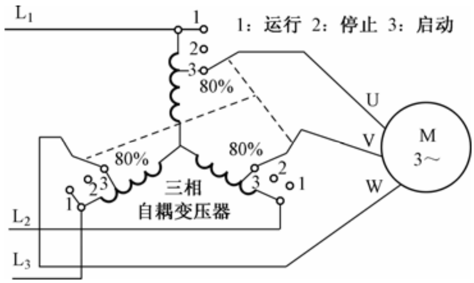


图 9-7　自耦减压启动器或补偿器结构原理

从图 9-7 可以看出，自耦减压启动器有三相线圈，在使用时，三相线圈的末端连接在一起接成星形，首端分别与 L_1、L_2、L_3 三相电源连接。自耦减压启动器有三个联动开关，每个开关都有“运行”、“停止”、“启动”3 个挡位。当开关处于“停止”挡位时，开关触点悬空，电动机无供电不工作，当开关处于“运行”挡位时，三相电源直接供给电动机，电动机全压运行，当开关处于“启动”挡位时，三相电源经变压器降压至 80%供给电动机，电动机降压启动。

2．手动控制启动器降压线路

手动控制启动器降压线路常用到 QJ3 油浸式启动器，其外形如图 9-8 所示，这种启动器内部除了有三相自耦变压器结构外，还包括一些保护装置。手动控制启动器降压线路说明见表 9-13。



图 9-8　QJ3 油浸式启动器

表 9-13　手动控制启动器降压线路说明

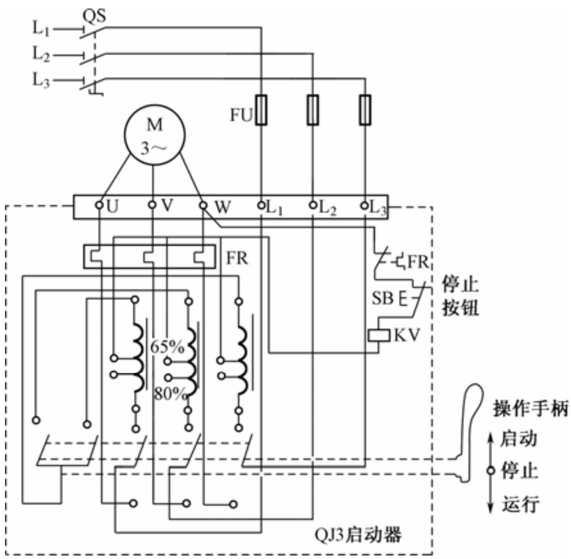
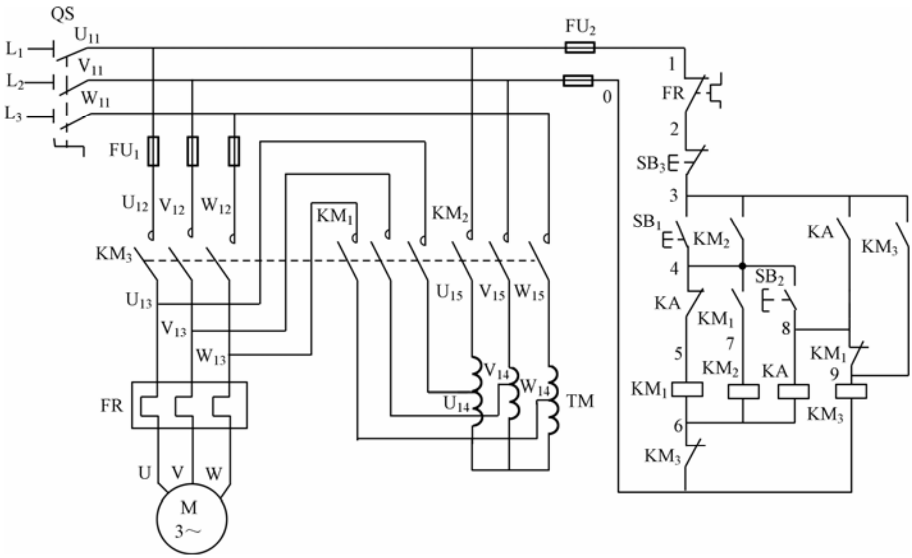
<table>
<tr><th>关键点</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td>线路图</td><td>由 QJ3 启动器构成的手动控制启动器降压线路如图 1 所示。


图 1　由 QJ3 启动器构成的手动控制启动器降压线路</td></tr>
<tr><td>线路说明</td><td>图 1 虚线框内部分为启动器，它有 6 个接线端，分别与三相电源和电动机连接，操作启动器的手柄可以对电动机进行启动/停止/运行控制。
电路工作原理分析如下：
①闭合电源开关 QS。
②降压启动。将启动器手柄旋至“启动”挡→与手柄联动的 5 个动触点与上方各自的静触点接通→左方两个触点接通，将自耦变压器的三相线圈末端连接在一起（即接成星形）；右方三个触点接通，将三相电源送到三相线圈的首端→取三相线圈上 65%的电压送给电动机→电动机被降压启动。
③全压供电。将启动器手柄旋至“运行”挡→与手柄联动的左方两个动触点悬空，右方三个动触与下方各自的静触点接通→三相电源直接通过热继电器发热元件 FR 送给电动机→电动机全压运行。
④停止控制。按下停止按钮 SB→启动器的欠压脱扣，线圈 KV 失电→线圈 KV 无法吸引内部衔铁，通过传动机构让启动器自动掉闸，手柄自动旋至“停止”挡→与手柄联动的 5 个动触点均悬空→电动机失电停转。
⑤断开电源开关 QS。
采用 QJ3 系列启动器来降压启动时，由于手柄切换挡位时都是带电操作，动触点与静触点之间容易出现电弧，为了消除电弧对触点的损伤，与手柄联动的几个触点都要浸在绝缘油内。</td></tr>
</table>

3. 按钮、接触器和中间继电器控制启动器降压线路

按钮、接触器和中间继电器控制启动器降压线路说明见表 9-14 ，由于采用了接触器来进行降压、全压切换，故只需用普通的自耦变压器即可。

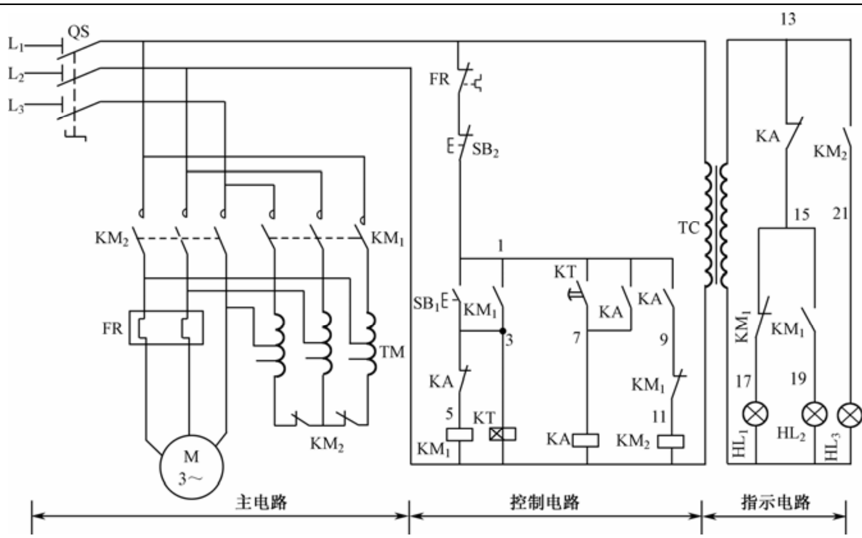
表 9-14　按钮、接触器和中间继电器控制启动器降压线路说明

关键点	说　　明
线路图	 图 1　按钮、接触器和中间继电器控制启动器降压线路
线路说明	**电路工作原理分析如下：** **① 闭合电源开关 QS。** **② 降压启动。**按下降压启动按钮 SB_1→KM_1 线圈得电→KM_1 主触点闭合、KM_1 常开辅助触点闭合、KM_1 常闭触点断开→KM_1 主触点闭合，将自耦变压器 TM 降压端与电动机相连接；KM_1 常开辅助触点闭合，使 KM_2 线圈得电；KM_1 常闭辅助触点断开，使 KM_3 线圈无法得电→KM_2 线圈得电使 KM_2 主触点闭合、KM_2 常开辅助触点闭合→KM_2 主触点闭合，三相电源送给自耦变压器 TM，经降压后通过 KM_1 主触点送给电动机，电动机被降压启动；KM_2 常开辅助触点闭合，让 KM_1、KM_2 线圈在 SB_1 断开时继续得电（自锁）。 **③全压供电。**电动机降压启动运转后，按下全压运行按钮 SB_2→中间继电器线圈 KA 得电→KA 常开触点闭合、KA 常闭辅助触点断开→KA 常开触点闭合，使 KA 线圈在 SB_2 断开时能继续得电（自锁）；KA 常闭辅助触点断开，使 KM_1 线圈失电→KM_1 线圈失电会使 KM_1 主触点断开、KM_1 常闭辅助触点闭合、KM_1 常开辅助触点断开→KM_1 主触点断开，将提供给电动机的低压切断；KM_1 常开辅助触点断开使 KM_2 线圈失电；KM_1 常闭辅助触点闭合，使 KM_3 线圈得电→KM_2 线圈失电，使 KM_2 主触点断开，三相电源无法送给自耦变压器；KM_2 线圈失电也使 KM_2 常开辅助触点断开；KM_3 线圈得电使 KM_3 主触点闭合，三相电源直接送给电动机，让电动机全压运行，另外 KM_3 线圈得电，使 KM_3 常开辅助触点闭合，让 KM_3 线圈在 SB_2 断开时能继续得到供电。 **④停止控制。**按下停止按钮 SB_3→KM_1 线圈、KM_2、KM_3 均失电→KM_1、KM_2、KM_3 主触点均断开→电动机供电被切断而停转。 **⑤断开电源开关 QS。** 该线路在需要先操作降压启动按钮 SB_1，再操作按钮 SB_2 时才有效，这样避免误操作对电动机进行全压启动。

4. 时间继电器自动控制启动器降压线路

时间继电器自动控制启动器降压线路说明见表 9-15 。

表 9-15　时间继电器自动控制启动器降压线路说明

关键字	说　　明
线路图	 图 1　时间继电器自动控制启动器降压线路
	从图 1 可以看出，该线路由主电路、控制电路和指示电路构成，指示电路中有 3 个指示灯，HL_1 为电源指示灯，HL_2 为降压启动指示灯，HL_3 为全压运行指示灯。 **电路工作原理分析如下：** **①闭合电源开关 QS。** QS 闭合后，L_1、L_2 两相电压加到变压器 TC 一次绕组，经降压后在二次绕组得到较低的电压，该电压经中间继电器 KA 常闭触点和 KM_1 常闭辅助触点送到 HL_1 两端，HL_1 亮，显示电路处于通电状态。 **②降压启动。** 按下降压启动按钮 SB_1→接触器 KM1 线圈和时间继电器 KT 线圈均得电→KM_1 线圈通电使 KM_1 主触点闭合、KM_1 两个常开辅助触点（1、3 和 15、19）闭合、KM_1 两个常闭辅助触点（9、11 和 15、17）断开→KM_1 主触点闭合，三相电源送给自耦变压器 TM，经降压后送到电动机，电动机被降压启动；KM_1 常开辅助触点（1、3）闭合，使 KM_1 线圈在 SB_1 断开时能继续得电，KM_1 常开辅助触点（15、19）闭合使 HL_2 得电显示电路为降压启动状态；KM_1 常闭辅助触点（9、11）断开，使 KM_2 线圈无法得电，KM_1 常闭辅助触点（15、17）断开使 HL_1 失电熄灭。 **③全压运行。** 电动机降压启动运转一段时间后，时间继电器 KT 线圈也通电一段时间→KT 延时闭合常开触点闭合→中间继电器线圈 KA 得电→KA 两个常开触点（1、7 和 1、9）闭合、KA 两个常闭辅助触点（3、5 和 13、15）断开→KA 常开触点（1、7）闭合，使 KA 线圈在 SB_1 断开时能继续得电（自锁）；KA 常闭辅助触点（3、5）断开，使 KM_1 线圈失电；KA 常闭辅助触点（13、15）断开，使 HL_2 供电切断→KM_1 线圈失电使主触点断开、两个常开辅助触点（1、3 和 15、19）断开、两个常闭辅助触点（9、11 和 15、17）闭合→KM_1 主触点断开使自耦变压器失电；常开辅助触点（1、3）断开使时间继电器 KT 线圈失电；常闭辅助触点（9、11）闭合使 KM_2 线圈得电→KM_2 线圈得电使 KM_2 主触点闭合、常开辅助触点（13、21）闭合、两个常闭触点断开→KM_2 主触点闭合，使三相电源直接送给电动机，电动机全压运行；常开辅助触点（13、21）闭合使 HL_3 得电指示状态为全压运行；两个常闭触点断开使自耦变压器三组线圈中性点连接切断。

续表

关键字	说　　明
	④**停止控制。**按下停止按钮 SB_2→KM_1、KM_2、KT、KA 线圈均失电→KM_1、KM_2 主触点均断开，KA 常闭触点（13、15）闭合、KM_1 常闭辅助触点（15、17）闭合→ 电动机供电被切断而停转，同时 HL_1 得电指示电路为通电未工作状态（待机状态）。 ⑤**断开电源开关 QS。** 时间继电器自动控制启动器降压线路操作简单，降压大小可通过自耦变压器调节，降压启动时间可通过时间继电器调节，另外还有工作状态指示功能，适用于交流 50Hz、电压为 380V、功率在 14～300kW 的三相笼形异步电动机降压启动。由于这种降压控制线路优点突出，所以一些厂家将它制成降压启动自动控制设备，如 XJ01 系列自动控制启动器就采用这种电路制作而成。

9.7.3　星形—三角形（Y—Δ）降压启动控制线路

三相异步电动机接线盒有 U_1、U_2、V_1、V_2、W_1、W_2 共 6 个接线端，如图 9-9 所示，当 U_2、V_2、W_2 三端连接在一起时，内部绕组就构成了星形连接，当 U_1W_2、U_2V_1、V_2W_1 两两连接在一起时，内部绕组就构成了三角形连接。若三相电源任意两相之间的电压是 380V，当电动机绕组接成星形时，每个绕组上实际电压值为 $380V/\sqrt{3}$ =220V。当电动机绕组接成三角形时，每个绕组上电压值为 380V，由于绕组接成星形时电压降低，相应流过绕组的电流也减小（约为三角形接法的 1/3）。

星形－三角形（Y－Δ）降压启动控制线路就是在启动时将电动机的绕组接成星形，启动后再将绕组接成三角形，让电动机全压运行。当电动机绕组接成星形时，绕组上的电压低、流过的电流小，因而产生的力矩也小，所以星形－三角形降压启动只适用于轻载或空载启动。

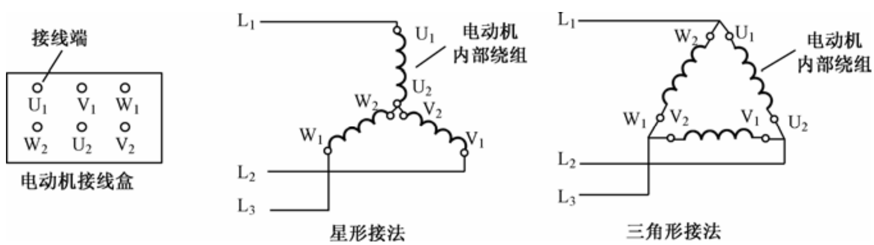


图 9-9　三相异步电动机接线盒与两种接线方式

实现星形－三角形（Y－△）降压启动控制的线路很多，表 9-16 介绍了三种较常见的 Y－△降压启动控制线路。

表 9-16　三种较常见的 Y－△降压启动控制线路说明

类型	说　　明
手动控制 Y－△降压启动线路	在手动控制 Y－△降压启动控制线路中，需要用到手动 Y－△启动器。QX1 型手动 Y－△启动器是一种应用很广的启动器，其外形如图 1 所示。由 QX1 型手动 Y－△启动器构成的降压启动控制线路如图 2 所示。手动控制启动器手柄有“启动”、“停止”和“运行”三个位置，内部有 8 个触点，手柄处于不同位置时各触点的状态见表 1。

续表

类型	说　　明
	见下文



图 1　QX1 型手动 Y－△启动器

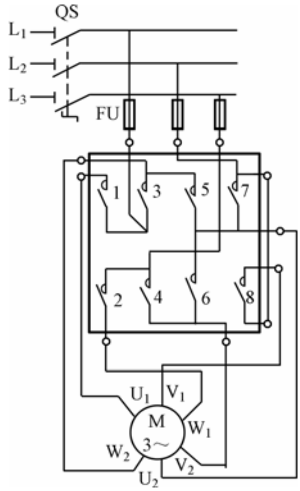


图 2　QX1 型启动器降压启动控制线路

表 1　启动器手柄位置与各触头的状态

触头	手柄位置		
	启动Y	停止0	运行A
1	接通		接通
2	接通		接通
3			接通
4			接通
5	接通		
6	接通		
7			接通
8	接通		接通

电路工作原理分析如下：

①闭合电源开关 QS。

②星形启动。将启动器手柄旋至“启动”位置→与手柄联动的 8 个触点中的 1、2、5、6、8 触点闭合→电动机绕组 U_2、V_2、W_2 端通过闭合的 6、5 触点连接，三个绕组接成星形→三相电源 L_1、L_2、L_3 通过闭合的 1、8、2 触点供给电动机 U_1、V_1、W_1 端→电动机绕组接成星形启动。

③三角形正常运行。电动机绕组接成星形启动后，将启动器手柄旋至“运行”位置→与手柄联动的 1、2、3、4、7、8 触点闭合→电动机绕组 U_1、W_2 端通过 1、3 触点连接，U_2、V_1 端通过 8、7 触点连接，V_2、W_1 端通过 6 触点连接，三个绕组接成三角形→三相电源 L_1、L_2、L_3 通过闭合的 1、8、2 触点供给电动机 U_1、V_1、W_1 端→电动机绕组接成三角形正常运行。

④停止控制。将启动器手柄旋至“停止”位置→与手柄联动的 8 个触点均断开→电动机 3 个绕组 6 个接线端均悬空→电动机停止运行。

⑤断开电源开关 QS。

续表

<table>
<tr><th>类型</th><th>说　明</th></tr>
<tr><td>按钮、接触器控制 Y－△降压启动线路</td><td>
按钮、接触器控制 Y－△降压启动线路如图 3 所示。

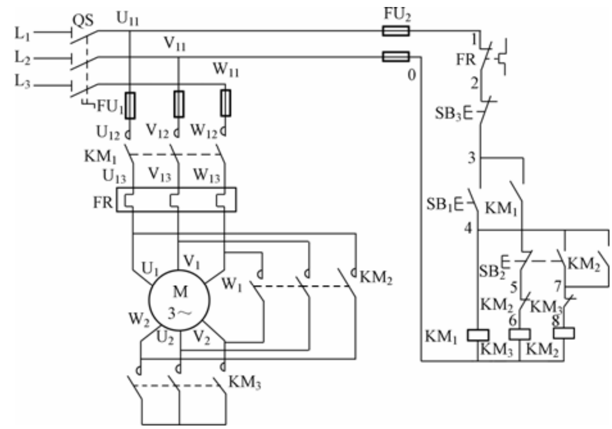


图 3　按钮、接触器控制 Y－△降压启动线路

电路工作原理分析如下：

①闭合电源开关 QS。

②星形降压启动控制。按下星形启动按钮 SB_1→接触器 KM_1 线圈和 KM_3 线圈均得电→KM_1 线圈得电，使 KM_1 主触点闭合、KM_1 常开辅助触点闭合，其中 KM_1 主触点闭合，让三相电源送到电动机 U_1、V_1、W_1 端，KM_1 常开辅助触点闭合，让 KM_1 线圈在 SB_1 断开时继续得电；KM_3 线圈得电使 KM_3 主触点闭合，电动机绕组 U_2、V_2、W_2 端连接，绕组接成星形，KM_3 线圈得电还会让 KM_3 常闭辅助触点断开，使 KM_2 线圈无法得电→电动机接成星形启动。

③三角形正常运行控制。电动机绕组接成星形启动后，按下三角形运行复合按钮 SB_2→SB_2 常闭触点断开、常开触点闭合→SB_2 常闭触点断开使 KM_3 线圈失电，KM_3 主触点断开，KM_3 常闭辅助触点闭合；SB_2 常开触点闭合，使 KM_2 线圈得电→KM_2 线圈得电，使 KM_2 主触点和常开辅助触点均闭合→KM_2 常开辅助触点闭合，使 KM_2 线圈在 SB_2 断开时继续得电，KM_2 主触点闭合，使电动机绕组接成三角形正常运行。

④停止控制。按下停止按钮 SB_3→KM_1、KM_2、KM_3 线圈均失电→KM_1、KM_2、KM_3 主触点均断开→电动机供电被切断而停转。

⑤断开电源开关 QS。
</td></tr>
<tr><td>时间继电器自动控制 Y－△降压启动线路</td><td>
时间继电器自动控制 Y－△降压启动线路如图 4 所示。

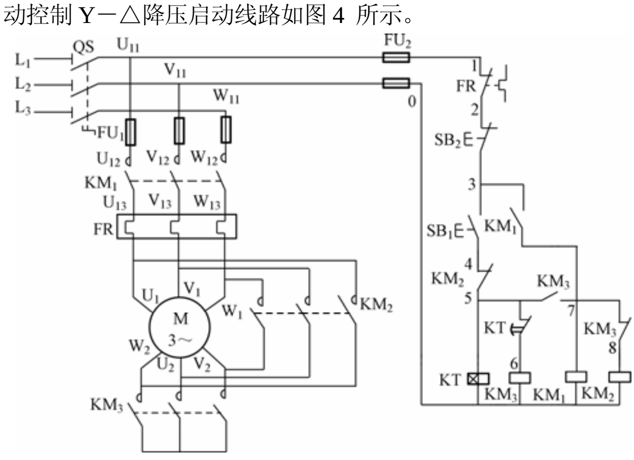


图 4　时间继电器自动控制 Y－△降压启动线路
</td></tr>
</table>

续表

类型	说　　明
	电路工作原理分析如下： **①闭合电源开关 QS。** **②星形降压启动控制。**按下启动按钮 SB_1→接触器 KM_3 线圈和时间继电器 KT 线圈均得电→KM_3 主触点闭合、KM_3 常开辅助触点闭合、KM_3 常闭辅助触点断开→KM_3 主触点闭合，将电动机三个绕组接成星形； KM_3 常闭辅助触点断开，使 KM_2 线圈的供电切断；KM_3 常开辅助触点闭合使 KM_1 线圈得电→KM_1 线圈得电，使 KM_1 常开辅助触点和主触点均闭合→KM_1 常开辅助触点闭合，使 KM_1 线圈在 SB_1 断开后继续得电；KM_1 主触点闭合，使电动机 U_1、V_1、W_1 端得电，电动机星形启动。 **③三角形正常运行控制。**时间继电器 KT 线圈得电一段时间后，延时常闭触点 KT 断开→KM_3 线圈失电→KM_3 主触点断开、KM_3 常开辅助触点断开、KM_3 常闭辅助触点闭合→KM_3 主触点断开，撤销电动机三个绕组的星形连接；KM_3 常闭辅助触点闭合，使 KM_2 线圈得电→KM_2 线圈得电，使 KM_2 常闭辅助触点和 KM_2 主触点均闭合→KM_2 常闭辅助触点断开，使 KT 线圈失电；KM_2 主触点闭合，将电动机三个绕组接成三角形方式，电动机以三角形方式正常运行。 **④停止控制。**按下停止按钮 SB_2→KM_1、KM_2、KM_3 线圈均失电→KM_1、KM_2、KM_3 主触点均断开→电动机因供电被切断而停转。 **⑤断开电源开关 QS。**

9.7.4　延边三角形降压启动控制线路

电动机接成星形方式启动时，绕组两端的电压很低（约为三角形接法的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$），产生的力矩小，故只能是空载或轻载启动。为了解决星形方式启动的缺点，可在启动时将三个绕组接延边三角形方式，启动运行正常后再将三个绕组接成三角形方式。

1. 延边三角形接线方式

延边三角形接线方式是将星形和三角形结合起来的接线方式，采用延边三角形接线的电动机有 9 个接线端（普通电动机只有 6 个），如图 9-10（a）所示，每个绕组都从中间引出一个接线端，该接线端将每个绕组分成匝数为 N_1、N_2 两部分。在启动时将 U_3、W_3、V_3 分别与 W_2、V_2、U_2 连接，这样部分绕组接成星形，另一部分接成三角形，即绕组接成延边三角形方式。

在启动时，如果 U_1、W_1、V_1 任意两端之间的电压是 380V，若电动机绕组接成延边三角形方式，每个绕组两端电压就会大于 220V 而小于 380V。例如，U_1、V_1 之间的电压为 380V，U_1U_2 绕组上的电压会低于 380V，因为绕组 V_1V_3 也会承受一部分电压。由于电动机绕组接成延边三角形时，每个绕组上的电压比接成三角形时更高，所以可带较重的负载启动。在电动机启动运行正常后，再将三个绕组接成如图 9-10（b）所示的三角形接法，每个绕组两端有 380V 电压。

当电动机接成延边三角形方式时，每个绕组上的电压大小与 N_1、N_2 匝数有关。电动机接成延边三角形时，绕组的不同匝数比的启动特性见表 9-17。

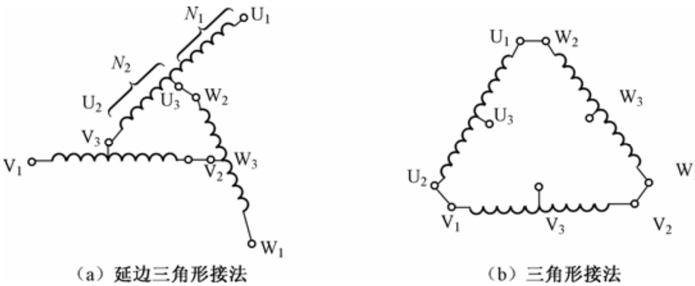


图 9-10　延边三角形接线电动机的两种接线方式

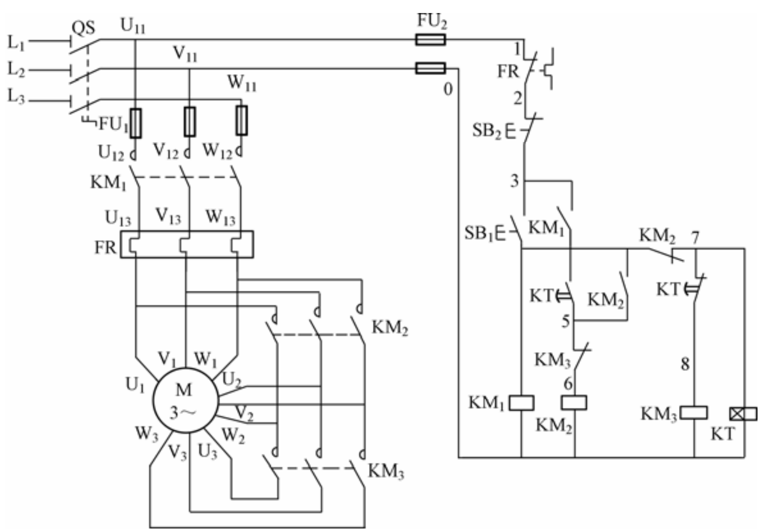
表 9-17　电动机接成延边三角形时绕组不同匝数比的启动特性

定子绕组匝数比 $K=N_1:N_2$	延边△启动时每相绕组电压/V	启动电流为额定电流的倍数	启动转矩为全压启动时的百分比	相当于自耦变压器的匝数百分比
1:1	270	3～3.5	50%	71%
1:2	296	3.6～4.2	60%	78%
2:1	250	2.6～3.1	42%	66%
当 N_2 绕组为 0 时即为 Y 形连接	220V	2～2.3	33.3%	58%

2．延边三角形降压启动控制线路

延边三角形降压启动控制线路说明见表 9-18。

表 9-18　延边三角形降压启动控制线路说明

关键点	说　　明
线路图	 图 1　延边三角形降压启动控制线路

续表

关键点	说　　明
线路说明	**电路工作原理分析如下：** **①闭合电源开关 QS。** **②延边三角形降压启动控制。**按下启动按钮 SB_1→接触器 KM_1、KM_3 和时间继电器 KT 线圈均得电→KM_1 线圈得电，使 KM_1 主触点、KM_1 常开辅助触点闭合，KM_1 主触点闭合，使电动机 U_1、V_1、W_1 端得电，KM_1 常开辅助触点闭合，使 SB_1 断开后 KM_1 线圈继续得电（自锁）；KM_3 线圈得电，使 KM_3 常闭辅助触点断开、KM_3 主触点闭合，KM_3 常闭辅助触点断开切断 KM_2 线圈供电，KM_3 主触点闭合将电动机绕组接成延边三角形启动。 **③三角形正常运行控制。**时间继电器 KT 线圈得电一段时间后→KT 的延时断开常闭触点断开、延时闭合常开触点闭合→KT 延时断开常闭触点断开，使 KM_3 线圈失电，KM_3 主触点断开，撤销电动机绕组的延边三角形接法；KT 延时闭合常开触点闭合，使 KM_2 线圈得电，KM_2 常开辅助触点闭合、常开辅助触点断开、主触点闭合→KM_2 常开辅助触点闭合使线圈 KT 失电；KM_2 常开辅助触点闭合，使 KM_2 线圈在 KT 常开触点断开后继续得电；KM_2 主触点闭合，将电动机绕组接成三角形，电动机以三角形方式正常运行。 **④停止控制。**按下停止按钮 SB2→KM_1、KM_2、KM_3、KT 线圈均失电→KM_1、KM_2、KM_3 主触点均断开→电动机因供电被切断而停转。 **⑤断开电源开关 QS。**

9.8 绕线转子电动机启动控制线路

绕线转子电动机是指转子采用绕线形式的电动机，绕线转子电动机的结构可参见第 8 章图 8-11。**与鼠笼式电动机相比，绕线转子电动机的启动力矩大，并且可以通过改变转子绕组回路电阻的大小来调节转速。**

9.8.1　绕线转子电动机转速调速与启动方式

1. 调速原理

绕线转子电动机电气接线如图 9-11 所示，定子绕组 U、V、W 绕组接成星形，并与三相电源连接，安装在转子上的绕组 A、B、C 也接成星形，它们通过滑环（与转子同步运转）与固定的电刷连接，电刷外接变阻器。

当三相电源提供给定子绕组时，定子绕组产生旋转磁场，处于磁场中的转子绕组中产生感应电流，因为磁场对有电流的导体会产生作用力，所以处在定子绕组磁场中有感应电流的转子绕组就会旋转起来，转子也就随之旋转。**转子绕组的转速与感应电流大小有关，电流越大，转速越快，**在图 9-11 中，用虚线标出由绕组 A 流向绕组 B、C 的电流途径，从图中可以看出，电流大小与变阻器的大小有关，当变阻器滑动上移时，阻值变大，转子绕组回路电流减小，转子绕组转速变慢。

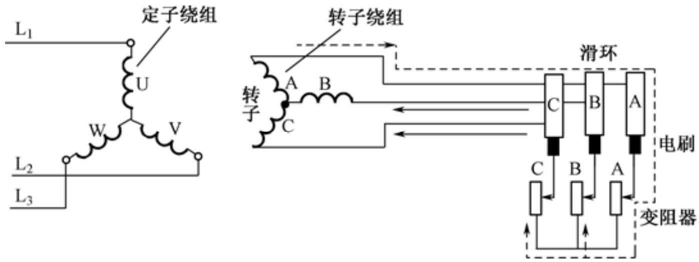


图 9-11　绕线转子电动机电气接线图

2. 启动方式

绕线转子电动机一般通过改变转子绕组回路的电阻进行启动。在刚启动时，转子绕组回路的电阻值较大，转子以较慢的转速启动，然后随着转速的加快，逐步减小电阻。绕线转子电动机启动调速方式如图 9-12 所示。

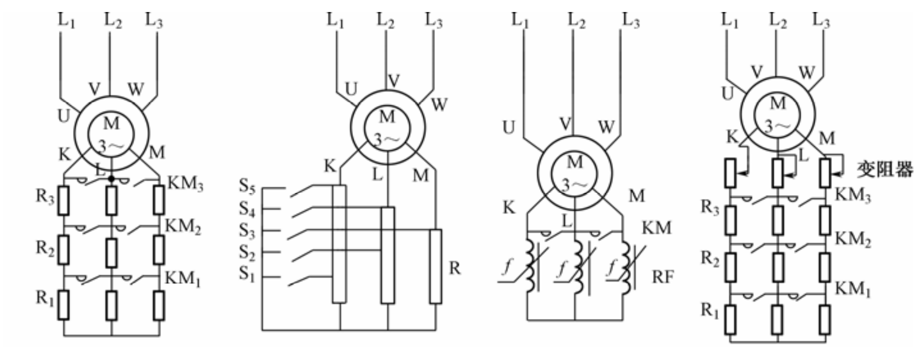


图 9-12　绕线转子电动机启动调速方式

图 9-12（a）为对称串接电阻启动方式。在启动过程中，依次让 KM_1、KM_2、KM_3 触点闭合，转子绕组回路的电阻逐渐减小。例如，当 KM_1 闭合后电阻 R_1 不起作用，回路电阻只剩下 R_2 和 R_3，当 KM_3 触点闭合后，R_1、R_2、R_3 均不起作用，电动机正常运行。

图 9-12（b）为不对称串接电阻启动方式。在启动过程中，依次让开关 S_1、S_2、S_3、S_4、S_5 闭合，转子绕组回路的电阻逐渐减小，当所有的触点都闭合后电动机正常运行。

图 9-12（c）为频敏变阻器启动方式。RF 为频率变阻器，它实际上是一个三相电抗器（电感器），其特点是对高频电流阻碍大，对低频电流阻碍小。电动机刚启动时，转子尚未转动，定子绕组产生的旋转磁场高速旋转，转子绕组高速切割磁场，产生频率很高的感应电流，转子回路的频敏变阻器呈现高阻抗，转子绕组回路电流较小，随着转子转速变快，转子绕组与定子旋转磁场相对转差逐渐减小，转子绕组切割磁场的相对速度逐渐变慢，转子绕组产生的感应电流频率逐渐降低，频敏变阻器对感应电流阻抗逐渐减小，转子绕组回路的电流逐渐增大。电动机启动完成后，KM 触点闭合，频率变阻器被短接不起作用，电动机正常运转。

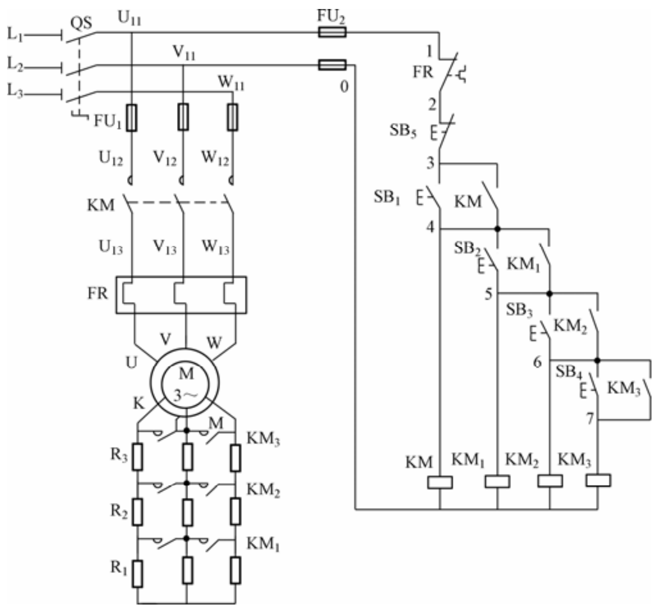
图 9-12（d）为启动和调速综合方式。这种方式是在对称串接电阻启动方式的基础上增加一个用于调速的变阻器。KM_3 闭合后电动机正常启动，如果调节变阻器的阻值，转子绕组回路的电阻就会发生变化，回路的电流也会改变，转子绕组转速也随之变化。

9.8.2　转子绕组串接电阻启动控制线路

1. 按钮手动控制串接电阻启动线路

按钮手动控制串接电阻启动线路说明见表 9-19。

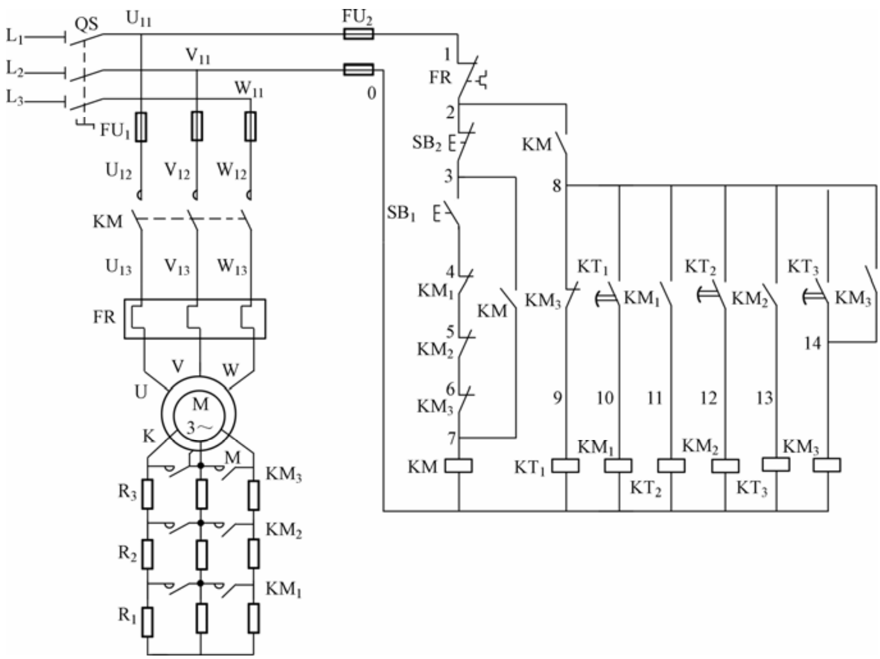
表 9-19　按钮手动控制串接电阻启动线路说明

关键点	说　　明
线路图	 图 1　按钮手动控制串接电阻启动线路
线路说明	**电路工作原理分析如下：** **①闭合电源开关 QS。** **②启动控制。**按下启动按钮 SB_1→接触器 KM 线圈得电→KM 常开辅助触点和主触点均闭合→KM 常开辅助触点闭合，使 SB_1 断开后 KM 线圈继续得电（自锁）；KM 主触点闭合，使电动机 U、V、W 端得电，由于 KM_1、KM_2、KM_3 主触点均断开，故电阻 R_1、R_2、R_3 全部接入转子绕组回路，转子低速运行，即电动机低速启动。 **③一次手动提速控制。**按下一次提速按钮 SB_2→接触器 KM_1 线圈得电→KM_1 常开辅助触点、主触点均闭合→KM_1 常开辅助触点闭合，使 SB_2 断开后 KM_1 线圈能继续得电；KM_1 主触点闭合将电阻 R_1 短路，转子绕组回路所接电阻减小（R_2+R_3），转子转速提高。 **④二次手动提速控制。**按下二次提速按钮 SB_3→接触器 KM_2 线圈得电→KM_2 常开辅助触点、主触点均闭合→KM_2 常开辅助触点闭合使 SB_3 断开后 KM_2 线圈能继续得电；KM_2 主触点闭合，将电阻 R_2 短路，转子绕组回路所接电阻进一步减小（R_3），转子转速进一步提高。 **⑤三次手动提速控制。**按下三次提速按钮 SB_4→接触器 KM_3 线圈得电→KM_3 常开辅助触点、主触点均闭合→KM_2 常开辅助触点闭合使 SB_4 断开后 KM_3 线圈能继续得电；KM_3 主触点闭合将电阻 R_{32} 短路，转子绕组回路所接电阻为 0，转子全速运行。 **⑥停止控制。**按下停止按钮 SB_5→KM、KM_1、KM_2、KM_3 线圈均失电→KM、KM_1、KM_2、KM_3 主触点均断开→电动机因供电被切断而停转。 **⑦断开电源开关 QS。**

2. 时间继电器自动控制串接电阻启动线路

时间继电器自动控制串接电阻启动线路说明见表 9-20。

表 9-20　时间继电器自动控制串接电阻启动线路说明

关键点	说　　明
线路图	 图 1　时间继电器自动控制串接电阻启动线路
线路说明	**电路工作原理分析如下：** ①**闭合电源开关 QS。** ②**启动控制。**按下启动按钮 SB_1→接触器 KM 线圈得电→KM 两个常开辅助触点和主触点均闭合→KM 常开辅助触点（3、7）闭合，使 SB_1 断开后 KM 线圈继续得电（自锁）；KM 常开辅助触点（2、8）闭合，使时间继电器线圈 KT_1 得电；KM 主触点闭合使电动机 U、V、W 端得电，由于 KM_1、KM_2、KM_3 主触点均断开，故电阻 R_1、R_2、R_3 全部接入转子绕组回路，转子低速启动，即电动机低速启动。 ③**一次自动提速控制。**时间继电器线圈 KT_1 得电一段时间后，KT_1 延时闭合常开触点闭合→接触器 KM_1 线圈得电→KM_1 常开辅助触点、主触点均闭合，KM_1 常闭辅助触点断开→KM_1 常开辅助触点闭合，使时间继电器线圈 KT_2 得电；KM1 主触点闭合将电阻 R_1 短路，转子绕组回路所接电阻减小（R_2+R_3），转子转速提高。 ④**二次自动提速控制。**时间继电器线圈 KT_2 得电一段时间后，KT_2 延时闭合常开触点闭合→接触器 KM_2 线圈得电→KM_2 常开辅助触点、主触点均闭合，KM_2 常闭辅助触点断开→KM_2 常开辅助触点闭合，使时间继电器线圈 KT_3 得电；KM_2 主触点闭合将电阻 R_2 短路，转子绕组回路所接电阻减小（R_3），转子转速进一步提高。

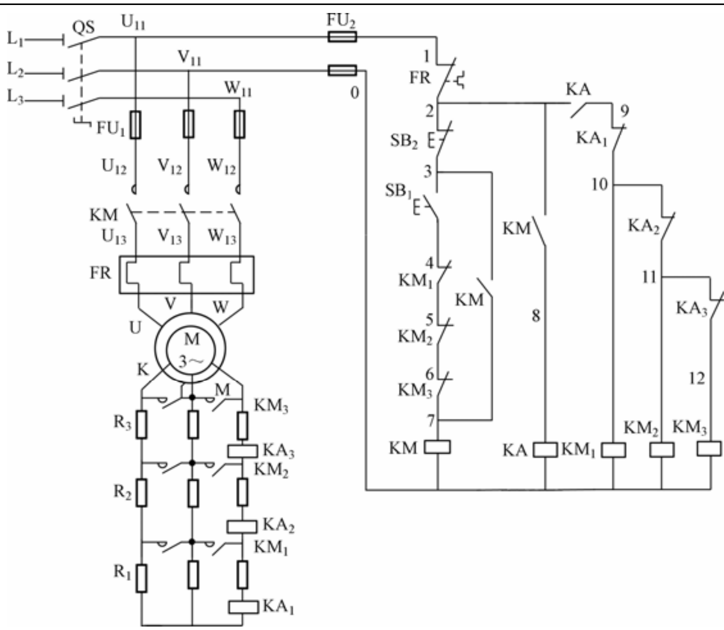
续表

关键点	说　　明
	⑤**三次自动提速控制。**时间继电器线圈 KT_3 得电一段时间后，KT_3 延时闭合常开触点闭合→接触器 KM_2 线圈得电→KM_3 常开辅助触点、主触点均闭合，KM_3 常闭辅助触点断开→KM_2 常开辅助触点闭合锁定 KM_3 线圈供电；KM_3 主触点闭合将电阻 R_3 短路，转子绕组回路所接电阻为 0，转子全速运行。 ⑥**停止控制。**按下停止按钮 SB_2→KM 线圈失电→KM 两个常开辅助触点均断开→KM 常开辅助触点（2、8）断开，使 KT_1、KM_1、KT_2、KM_2、KT_3、KM_3 线圈均失电→KM_1、KM_2、KM_3 主触点均断开→电动机因供电被切断而停转。 ⑦**断开电源开关 QS。** 线路中 KM_1、KM_2、KM_3 的常闭辅助触点与启动按钮 SB_1 串接，其功能是防止 KM_1、KM_2 或 KM_3 主触点因熔焊或机械故障未能断开时高速启动电动机。例如 KM_3 主触点因熔焊粘连无法断开，与主触点联动的 KM_3 常闭辅助触点则无法闭合，这时若按下启动按钮 SB_1，KM 线圈无法得电，各接触器和继电器都无法动作，电动机无法启动。若 KM_3 常闭辅助触点未与 SB_1 串接，按下启动按钮 SB_1，KM 线圈得电，转子绕组通过熔焊的 KM_3 主触点直接接通，电动机会全速启动，导致流入定子绕组的电流很大，会使熔断器 FU 熔断或影响三相电源的稳定。

3. 电流继电器自动控制串接电阻启动线路

电流继电器自动控制串接电阻启动线路说明见表 9-21。

表 9-21　电流继电器自动控制串接电阻启动线路说明

关键点	说　　明
线路图	 图 1　电流继电器自动控制串接电阻启动线路

续表

关键点	说　　明
线路说明	该电路采用 KA_1、KA_2、KA_3 三个过电流继电器，它们的吸合电流相同，释放电流不同，KA_1 释放电流最大，KA_2 次之，KA_3 最小。 **电路工作原理分析如下：** **①闭合电源开关 QS。** **②启动控制。**按下启动按钮 SB_1→接触器 KM 线圈得电→KM 两个常开辅助触点和主触点均闭合→KM 常开辅助触点（3、7）闭合，使 SB_1 断开后 KM 线圈继续得电（自锁）；KM 常开辅助触点（2、8）闭合使中间继电器线圈 KA 得电，KA 常开触点闭合；KM 主触点闭合使电动机 U、V、W 端得电，由于电动机刚启动时转子绕组回路的电流很大，故 KA_1、KA_2、KA_3 三个过电流继电器线圈流过的电流也很大，它们分别吸合 KA_1、KA_2、KA_3 常闭触点，使这些触点均断开，KM_1、KM_2、KM_3 线圈均不能得电，KM_1、KM_2、KM_3 主触点均断开，电阻 R_1、R_2、R_3 全部接入转子绕组回路，转子低速启动。 **③一次自动提速控制。**随着转子转速慢慢提高，转子绕组回路电流慢慢减小，当电流减小到过流继电器 KA_1 的释放电流时，KA_1 常闭触点闭合→接触器 KM_1 线圈得电→KM_1 主触点闭合→电阻 R_1 被短接，转子绕组回路所接电阻减小（R_2+R_3），转子转速提高。 **④二次自动提速控制。**随着转子转速的进一步提高，转子绕组回路电流不断减小，当电流减小到过流继电器 KA_2 的释放电流时，KA_2 常闭触点闭合→接触器 KM_2 线圈得电→KM_2 主触点闭合→电阻 R_2 被短接，转子绕组回路所接电阻减小（R_3），转子转速继续提高。 **⑤三次自动提速控制。**随着转子转速继续提高，转子绕组回路电流继续减小，当电流减小到过流继电器 KA_3 的释放电流时，KA_3 常闭触点闭合→接触器 KM_3 线圈得电→KM_3 主触点闭合→电阻 R_3 被短接，转子绕组回路所接电阻为 0，转子全速运转。 **⑥停止控制。**按下停止按钮 SB_2→KM 线圈失电→KM 两个常开辅助触点和主触点均断开→KM 常开辅助触点（2、8）断开，使线圈 KA 失电，KA 常开触点断开，KM_1、KM_2、KM_3 线圈均失电，KM_1、KM_2、KM_3 主触点均断开；KM 主触点断开，电动机因供电被切断而停转。 **⑦断开电源开关 QS。**

9.8.3　转子绕组串接频敏变阻器启动控制线路

转子绕组串接频敏变阻器启动控制线路说明见表 9-22 。

表 9-22　转子绕组串接频敏变阻器启动控制线路说明

关键点	说　　明
频敏变阻器	**频敏变阻器是一种对频率敏感器的电器，它实际上是三相电抗器（电感器），**其外形和符号如图 1 所示。  （a）外形　（b）符号 图 1　频敏变阻器

续表

<table>
<tr><th>关键点</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td></td><td>

频敏变阻器对交流信号有阻碍作用，交流信号频率越高，阻碍越大。在图 2 中，让交流信号电压值保持不变，若将交流信号的频率慢慢调高，频敏变阻器 RF 对交流电流 *i* 的阻碍逐渐增大，交流电流 *i* 慢慢减小。

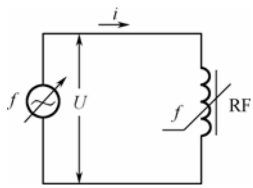
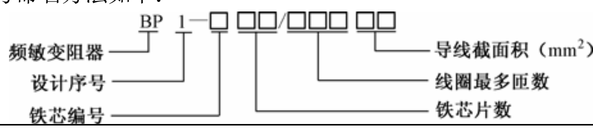


图 2　频敏变阻器工作原理

频敏变阻器的型号命名方法如下：



</td></tr>
<tr><td>转子绕组串接频敏变阻器启动控制线路</td><td>

转子绕组串接频敏变阻器启动控制线路如图 3 所示。

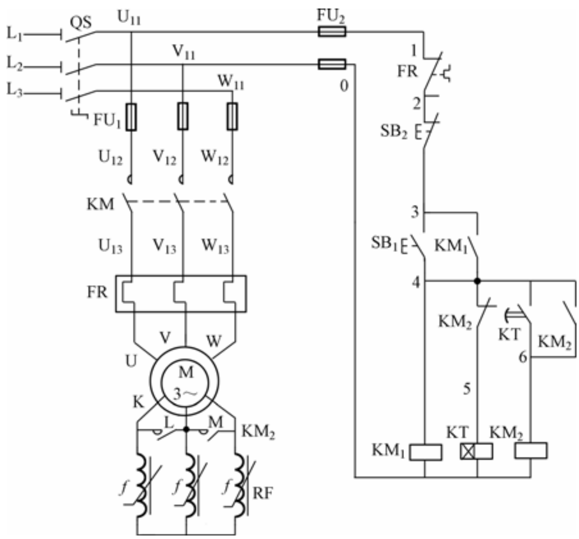


图 3　转子绕组串接频敏变阻器启动控制线路

电路工作原理分析如下：

①闭合电源开关 QS。

②启动控制。按下启动按钮 SB_1→接触器 KM_1 线圈得电，时间继电器线圈 KT 也得电→KM_1 常开辅助触点和主触点均闭合→KM_1 常开辅助触点闭合，使 SB_1 断开后 KM_1 线圈继续得电（自锁）；KM_1 主触点闭合，使电动机 U、V、W 端得电，在转子尚未转动，定子绕组产生的旋转磁场高速切割转子绕组，转子绕组产生频率很高的感应电流，转子绕组回路的频敏变阻器呈现高阻抗，转子绕组回路电流较小，转子转速较慢。

③自动提速控制。随着转子转速变快，转子绕组与定子旋转磁场相对转差逐渐减小，转子绕组切割磁场的相对速度逐渐变慢，转子绕组产生的感应电流频率逐渐降低，频敏变阻器对感应电流阻抗逐渐减小，转子绕组回路的电流逐渐增大，转子转速又继续提高。

</td></tr>
</table>

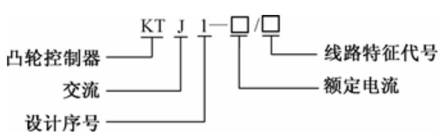
续表

关键点	说　　明
	④全速运行控制。由于在按下启动按钮 SB_1 时，时间继电器线圈 KT 会得电，经过一段时间（KT 的整定时间）后，KT 延时闭合常开触点闭合→KM_2 线圈得电→KM_2 常开辅助触点和主触点均闭合→KM_2 常开辅助触点闭合锁定 KM_2 线圈得电；KM_1 主触点闭合将频敏变阻器短接，电动机全速运行。 **⑤停止控制。**按下停止按钮 SB_2→KM_1、KT 和 KM_2 线圈均失电→KM_1、KM_2 主触点均断开，电动机因供电被切断而停转。 **⑥断开电源开关 QS。**

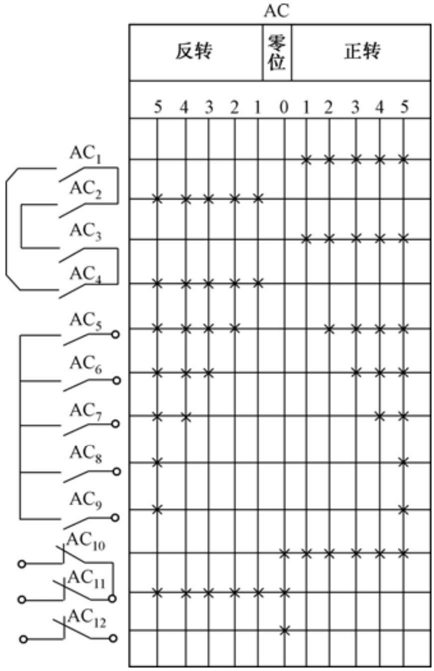
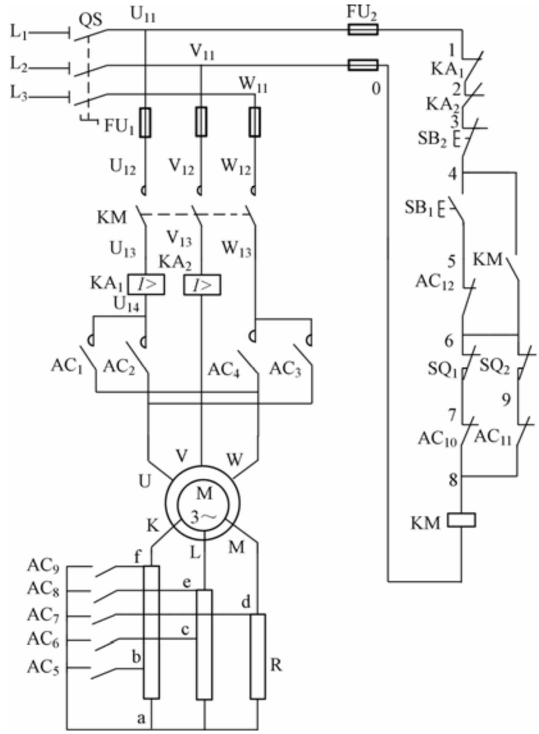
9.8.4　凸轮控制器启动、调速和正反转控制线路

凸轮控制器启动、调速和正反转控制线路说明见表 9-23。

表 9-23　凸轮控制器启动、调速和正反转控制线路说明

关键点	说　　明
凸轮控制器	**凸轮控制器是一种由多组触点组成的电器，各触点的通断由凸轮来控制。**凸轮控制器主要用在容量在 30kW 以下的中小型绕线转子异步电动机的控制线路中，在桥式起重机等设备中应用广泛。凸轮控制器外形和结构如图 1 所示。  图 1　凸轮控制器 凸轮控制器的型号及含义如下：  凸轮控制器型号不同，其触点组数和开合关系会有所不同，图 2 为 KTJ1-50/2 型凸轮控制器的触点分合表。从图中可以看出，该型号的凸轮控制器有 12 组触点，有“反转、零位、正转”三大挡，其中“正转”和“反转”挡各细分为 5 个小挡，分合表中的竖线表示挡位，横线表示触点，横竖线交叉处的*号表示触点闭合。例如，当凸轮控制器旋至“正转 3”挡时，从表中可以看出，AC_1、AC_3、AC_5、AC_6 和 AC_{10} 触点是闭合，其他的触点均断开。

续表

关键点	说　　明
凸轮控制器启动、调速和正反转控制线路	凸轮控制器启动、调速和正反转控制线路如图 3 所示，图中的 AC_1～AC_{12} 为凸轮控制器的 12 组触点。  图 2　KTJ1-50/2 型凸轮控制器的触点分合表　图 3　凸轮控制器启动、调速和正反转控制线路 **电路工作原理分析如下：** ①**闭合电源开关 QS。**再将凸轮控制器旋至“零位”，AC_{10}、AC_{11}、AC_{12} 三个触点闭合（见凸轮控制器分合表），为控制电路做好准备。 ②**启动准备。**按下启动按钮 SB1→接触器 KM 线圈得电→KM 常开辅助触点和主触点均闭合→KM 常开辅助触点闭合锁定 KM 线圈得电；KM 主触点闭合为启动电动机做好准备。 ③**正转启动控制。**将凸轮控制器旋至“正转 1”挡→AC_1、AC_3、AC_{10} 三个触点闭合→AC_1、AC_3 闭合使电动机得电正转启动，由于 AC_5～AC_9 均断开，电阻 R 全部接入电路，转子绕组回路的电流小，电动机慢速正向运行。 ④**正转提速控制。**将凸轮控制器旋至“正转 2”挡→AC_1、AC_3、AC_5、AC_{10} 四个触点闭合→AC_1、AC_3 闭合使电动机得电正转启动；AC_5 闭合将 ab 段电阻短路，转子绕组回路的电阻减小，电流增大，电动机转速提高。当将凸轮控制器依次旋至“正转 3、正转 4”挡时，除了 AC_1、AC_3 一直处于闭合外，AC_6、AC_7 触点依次闭合→ac 段、ad 段电阻依次短路，转子绕组回路的电阻逐渐减小，电流逐渐增大，电动机转速逐渐提高，当凸轮控制器旋至“正转 5”挡时，转子绕组回路的电阻全被短路，电动机全速运行。若凸轮控制器由“正转 5”挡依次旋至“正转 1”挡时，电动机则会逐渐减速。 ⑤**反转启动控制。**将凸轮控制器旋至“反转 1”挡→AC_2、AC_4、AC_{11} 三个触点闭合→AC_2、AC_4 闭合使电动机得电反转启动，由于 AC_5～AC_9 均断开，电阻 R 全部接入电路，电动机慢速反向运行。

续表

关键点	说　　明
	⑥**反转提速控制**。当将凸轮控制器依次旋至“反转 2、反转 3、反转 4”挡时，除了 AC_2、AC_4 一直处于闭合外，AC_5、AC_6、AC_7 触点依次闭合→ab 段、ac 段、ad 段电阻依次短路，转子绕组回路的电阻逐渐减小，电流逐渐增大，电动机反向转速逐渐提高，当凸轮控制器旋至“反转 5”挡时，转子绕组回路的电阻全被短路，电动机全速反向运行。 ⑦**停止控制**。按下停止按钮 SB_2→KM 线圈失电→KM 常开辅助触点和主触点均断开→KM 主触点断开，电动机因供电被切断而停转。 ⑧**断开电源开关 QS**。 KA_1、KA_2 为过流继电器，若流过电动机定子绕组的电流过大，继电器就会动作，KA_1、KA_2 常闭触点断开，接触器 KM 线圈失电，使主触点断开，切断电动机供电。AC_{10}、AC_{11}、AC_{12} 触点接在控制电路中，其作用是保证凸轮控制器只有处于“零位”挡时按下启动按钮 SB1，接触器 KM 线圈才能得电，KM 主触点才能闭合，然后再操作凸轮控制器逐级启动电动机，这样可防止凸轮控制器处于其他挡位时误操作 SB_1 高速启动电动机。位置开关 SQ_1、SQ_2 用做电动机正、反转限位控制保护，在电动机正转驱动运动部件运行时，若超出了规定位置，SQ1 被碰压断开，KM 线圈失电（正转时 AC_{11} 处于断开状态），KM 主触点断开，电动机失电停转，若电动机反转让运动部件运行超出了规定位置，SQ2 被碰压断开，KM 线圈失电（反转时 AC_{12} 处于断开状态），KM 主触点断开，电动机失电停转。

9.9 制动控制线路

电动机切断供电后并不会马上停转，而是依靠惯性继续运转一段时间。这种情况对于某些设备是不适合的，如起重机起吊重物到达一定的位置时切断电动机供电，要求电动机马上停转，否则容易造成安全事故。对电动机进行制动就可以解决这个问题。

电动机制动主要有两种方式：机械制动和电力制动。机械制动是在切断电动机供电后，利用一些机械装置（如电磁抱闸制动器）使电动机迅速停转。电力制动是在切断电动机电源后，利用一些电气线路让电动机产生与旋转方向相反的制动力矩进行制动。

9.9.1　机械制动线路

机械制动是采用机械装置对电动机进行制动。机械制动线路说明见表 9-24。

表 9-24　机械制动线路说明

关键点	说　　明
电磁制动器	**电磁制动器是最常见的机械制动装置。电磁制动器主要分电磁抱闸制动器和电磁离合制动器。** （1）电磁抱闸制动器 **电磁抱闸制动器主要由制动电磁铁和闸瓦制动器两部分组成**，制动电磁铁外形如图 1 所示，由制动电磁铁和闸瓦制动器组合成的电磁抱闸制动器结构如图 2 所示。

续表

<table>
<tr><th>关键点</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td></td><td>



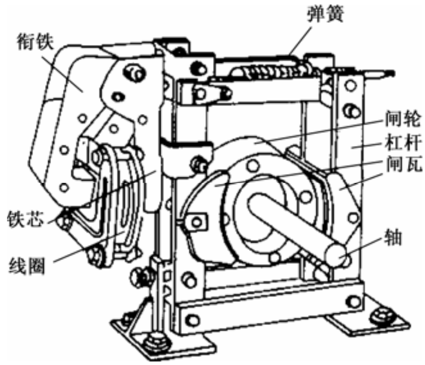


图 1　制动电磁铁　　　　图 2　由制动电磁铁和闸瓦制动器组成的电磁抱闸制动器

制动电磁铁由铁芯、衔铁和线圈三部分组成。当给线圈通电时，线圈产生磁场通过铁芯吸引衔铁，使衔铁产生动作，如果衔铁与有关设备连接，就可以使该设备也产生动作。

闸瓦制动器由闸轮、闸瓦、杠杆和弹簧等组成，闸轮的轴与电动机转轴连动。电磁抱闸制动器分为断电制动型和通电制动器。断电制动型的特点是当线圈得电时，闸瓦与闸轮分开，无制动作用，当线圈失电后，闸瓦紧紧抱住闸轮制动。通电制动型的特点是当线圈得电时，闸瓦紧紧抱住闸轮制动；当线圈失电时，闸瓦与闸轮分开，无制动作用。

磁抱闸制动器的制动力强，它安全可靠，不会因突然断电而发生事故，广泛应用在起重设备上。由于电磁抱闸制动器的体积较大，制动器磨损严重，快速制动时会产生振动。

（2）电磁离合制动器

电磁离合制动器的外形如图 3 所示，图 4 为断电型电磁离合制动器结构示意图。



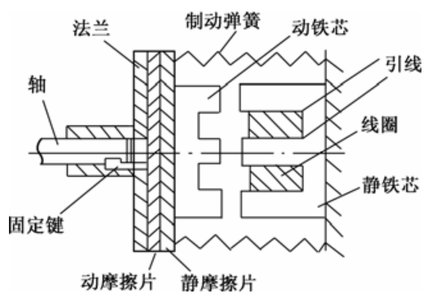


图 3　电磁离合制动器　　　　图 4　断电型电磁离合制动器结构示意图

断电型电磁离合制动器的工作原理如下：在电动机正常工作时，制动器线圈通电产生磁场，静铁芯吸引动铁芯，动铁芯克服制动弹簧的弹力并带动静摩擦片往静铁芯靠近，动摩擦片与静摩擦片脱离，动摩擦片通过固定键和电动机的轴一起运转。在电动机切断电源时，制动器线圈同时失电，在制动弹簧的弹力作用下，动铁芯带动静摩擦片往动摩擦片靠近，静摩擦片与动摩擦片接触后，依靠两摩擦片的摩擦力并通过固定键和电动机的轴对电动机进行制动。

</td></tr>
</table>

续表

<table>
<tr><th>关键点</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td>断电型电磁抱闸制动控制线路</td><td>

断电型电磁抱闸制动控制线路如图 5 所示。

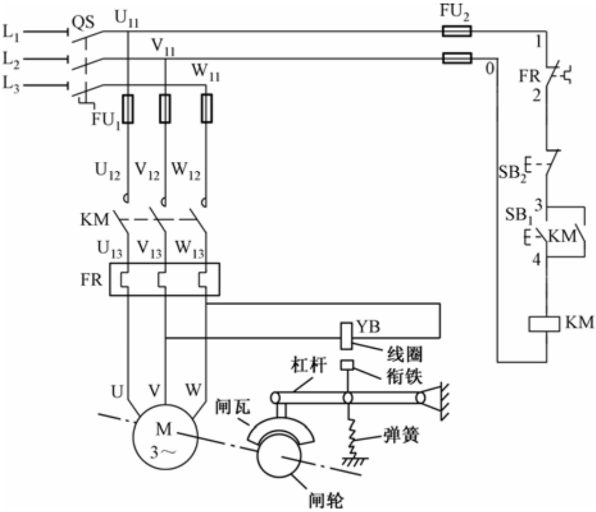


图 5　断电型电磁抱闸制动控制线路

电路工作原理分析如下：

①**闭合电源开关 QS。**

②**启动控制**。按下启动按钮 SB_1→接触器 KM 线圈得电→KM 常开辅助触点和主触点均闭合→KM 常开辅助触点闭合，使 SB_1 断开后 KM 线圈继续得电（自锁）；KM 主触点闭合使电动机 U、V、W 端得电，在电动机得电的同时，电磁制动器的线圈 YB 也得电，YB 产生磁场吸引衔铁，衔铁克服弹簧拉力带动杠杆上移，杠杆带动闸瓦上移，闸瓦与闸轮脱离，电动机正常运转。

③**制动控制**。按下停止按钮 SB_2→KM 线圈失电→KM 主触点断开→电动机失电，同时电磁制动器线圈 YB 也失电，弹簧将杠杆下拉，杠杆带动闸瓦下移，闸瓦与闸轮紧紧接触，通过转轴对电动机进行制动。

④**断开电源开关 QS。**

</td></tr>
<tr><td>通电型制动控制线路</td><td>

通电型电磁抱闸制动控制线路如图 6 所示。

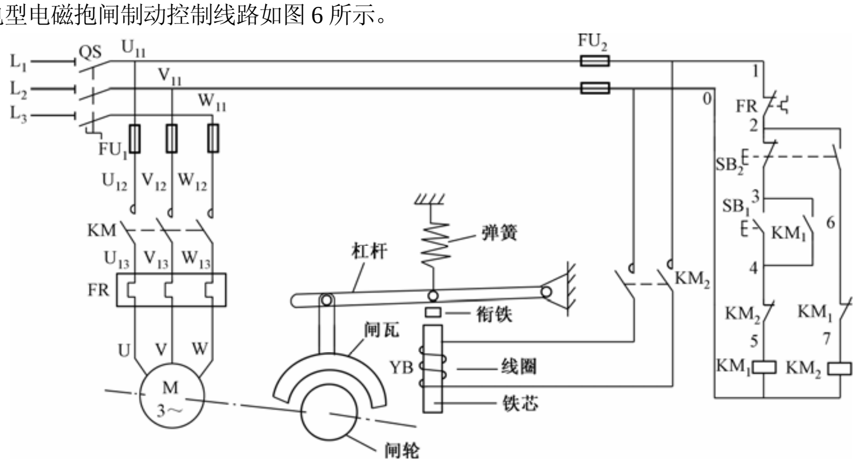


图 6　通电型电磁抱闸制动控制线路

</td></tr>
</table>

续表

关键点	说　　明
	电路工作原理分析如下： **①闭合电源开关 QS。** **②启动控制。**按下启动按钮 SB_1→接触器 KM_1 线圈得电→KM_1 常开辅助触点闭合、常闭辅助触点断开、主触点闭合→KM_1 常开辅助触点闭合，使 SB_1 断开后 KM 线圈继续得电（自锁）；KM_1 常闭辅助触点断开，使 KM_2 线圈无法得电；KM_2 主触点断开，电磁铁线圈 YB 失电，依靠弹簧的拉力使闸瓦与闸轮脱离；KM_1 主触点闭合，使电动机 U、V、W 端得电运转。 **③制动控制。**按下停止复合按钮 SB_2→接触器 KM_1 线圈失电，接触器 KM_2 线圈得电→KM_1 主触点断开使电动机失电；KM_2 主触点闭合使电磁铁线圈 YB 得电，吸引衔铁带动杠杆将闸瓦与闸轮抱紧，对电动机进行制动。电动机制动停转后，松开按钮 SB_2，KM_2 线圈失电，KM_2 主触点断开，电磁铁线圈 YB 失电，杠杆在弹簧的拉力下复位，闸瓦与闸轮脱离，解除电动机制动。 **④断开电源开关 QS。**

9.9.2　电力制动线路

电力制动是在切断电动机电源后，利用电气线路使电动机产生与旋转方向相反的制动力矩进行制动。电力制动方式主要有反接制动、能耗制动和电容制动等。

1. 反接制动

反接制动是在切断电动机的正常电源后，马上改变电源相序并提供给电动机，使电动机定子绕组产生相反的旋转磁场对依靠惯性运转的转子进行制动。反接制动控制线路说明见表 9-25。

表 9-25　反接制动控制线路说明

类型	说　　明
单向启动反接制动控制线路	单向启动反接制动控制线路如图 1 所示，图中的 KS 为速度继电器，安装在电动机转轴上，用来检测电动机旋转情况，当电动机转速接近零时，速度继电器触点 KS 会产生动作，停止制动。

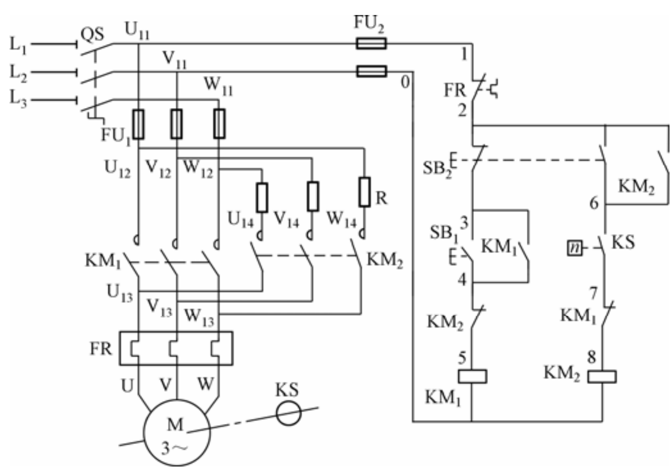


图 1　单向启动反接制动控制线路

续表

<table>
<tr><th>类型</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td></td><td>

电路工作原理分析如下：

①**闭合电源开关 QS。**

②**启动控制。**按下启动按钮 SB_1→接触器 KM_1 线圈得电→KM_1 常开辅助触点闭合、常闭辅助触点断开、主触点闭合→KM_1 常开辅助触点闭合使 SB_1 断开后 KM_1 线圈继续得电（自锁）；KM_1 常闭辅助触点断开，使 KM_2 线圈无法得电；KM_1 主触点闭合使电动机得电运转。在电动机运转期间，速度继电器 KS 常开触点处于闭合状态。

③**制动控制。**按下停止复合按钮 SB_2→接触器 KM_1 线圈失电，接触器 KM_2 线圈得电→KM_1 主触点断开使电动机失电；KM_2 主触点闭合，为电动机提供反转电源，电动机转子在反转磁场作用下，转速迅速降低→当电动机转速很低（小于 100r/min）时，速度继电器 KS 常开触点断开→接触器 KM_2 线圈失电→KM_2 主触点断开，电动机反转制动电源切断。

④**断开电源开关 QS。**

电动机在采用单向启动反接制动时，定子绕组旋转磁场与转子的相对速度（n_1+n）很高，定子绕组中的电流很大，可达额定电流的 10 倍，所以这种制动方式一般用做容量在 10kW 以下电动机的制动，并且对于 4.5kW 以下的电动机还需在反转供电线路中串接限流电阻 R。限流电阻 R 的大小可根据下面两个经验公式来估算：

$R \approx 1.5 \times 220 / I_{启动电流}$（在电源电压为 380V，要求制动电流为启动电流一半时）

$R \approx 1.3 \times 220 / I_{启动电流}$（在电源电压为 380V，要求制动电流等于启动电流时）

若仅在两相反接制动线路中串接电阻，一般要求电阻值为上面估算值的 1.5 倍。

</td></tr>
<tr><td>双向启动反接制动控制线路</td><td>

双向启动反接制动控制线路如图 2 所示。

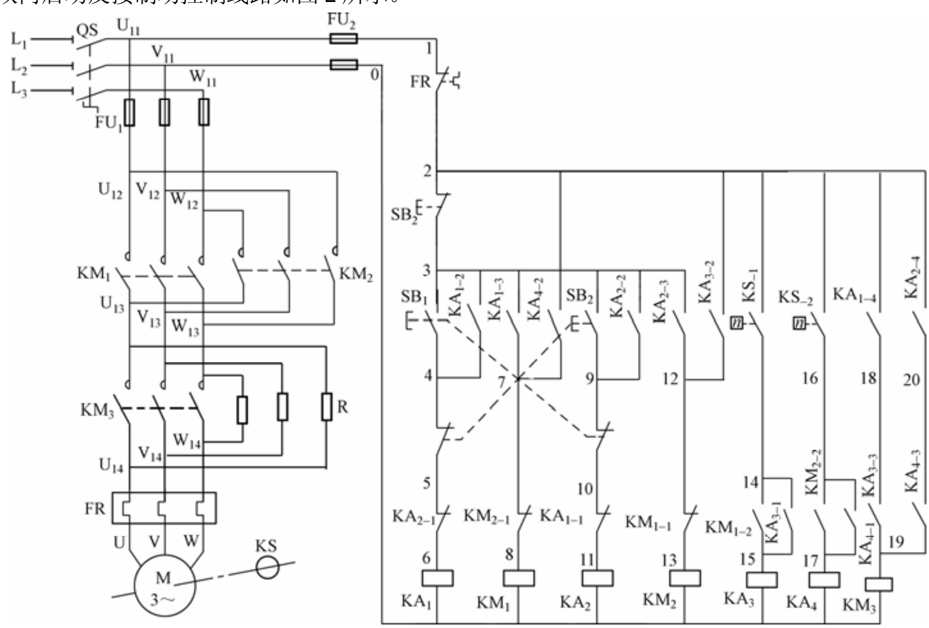
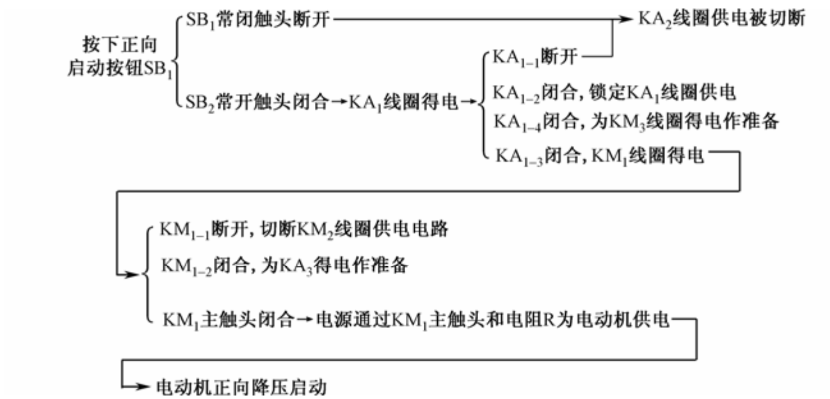


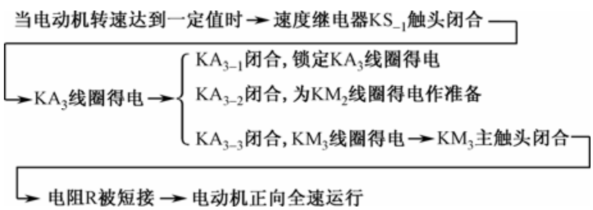
图 2　双向启动反接制动控制线路

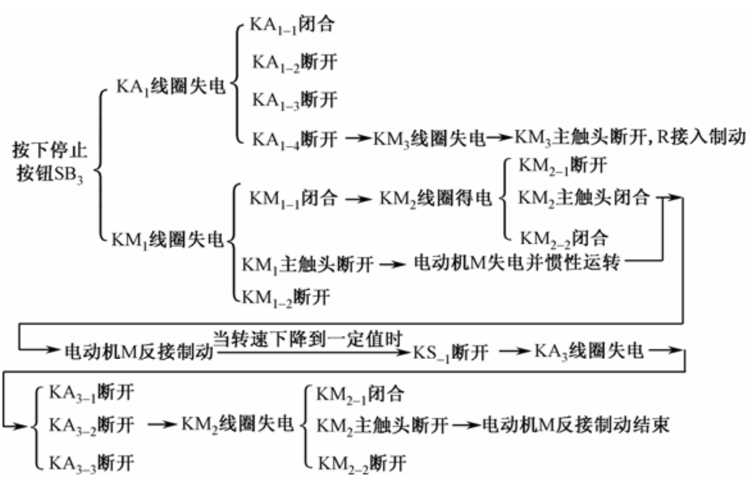
双向启动反接制动控制线路可以对电动机进行正向降压启动、反接制动，也可以对电动机反向降压启动、反接制动。图中的接触器 KM_1、KM_3 和中间继电器 KA_1、KA_2 用做正向启动、反接制动控制；接触器 KM_2、KM_3 和中间继电器 KA_2、KA_4 用做反向启动、反接制动控制；速度继电器 KS 有 KS_{-1} 和 KS_{-2} 两个常开触点，分别用做正转和反转速度检测。

</td></tr>
</table>

续表

<table>
<tr><th>类型</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td></td><td>
双向启动反接制动控制线路对电动机的正向降压启动、反接制动原理与反向降压启动、反接制动基本相同，下面仅介绍线路对电动机正向降压启动和反接制动控制。
电路工作原理分析如下：
①闭合电源开关 QS。
②正向降压启动控制。


③正向全速运行控制。


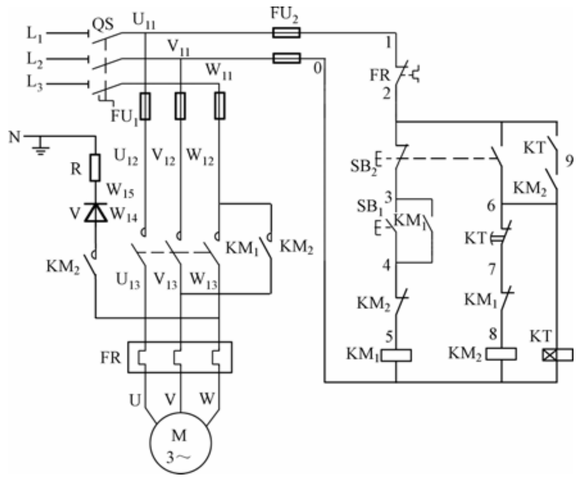
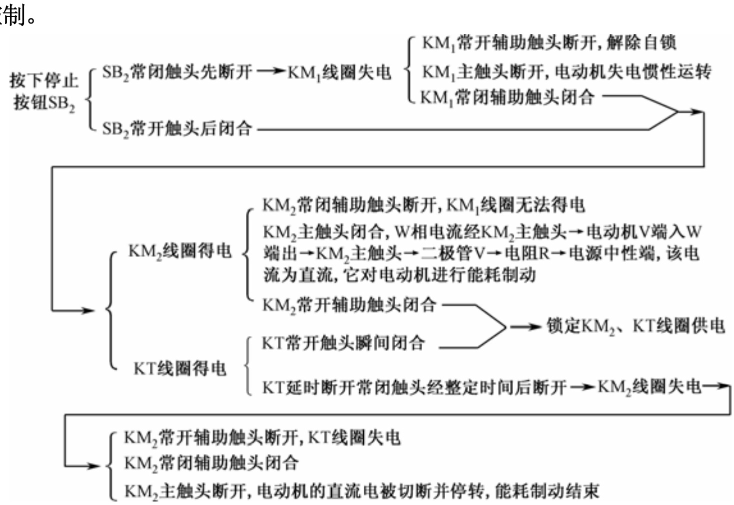
④反接制动控制。


⑤ 断开电源开关 QS。
</td></tr>
</table>

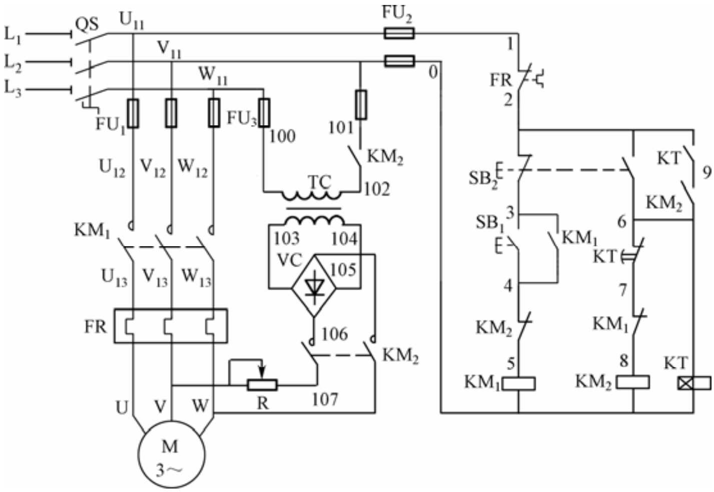
2. 能耗制动

能耗制动是在电动机切断交流电源后，给任意两相定子绕组通入直流电，使直流电产生与转子旋转方向相反的制动力矩来消耗转子的惯性来进行制动。能耗制动控制线路说明见表 9-26。

表 9-26　能耗制动控制线路说明

类型	说　明
无变压器单相半波整流能耗制动控制线路	无变压器单相半波整流能耗制动控制线路如图 1 所示，该线路采用一个二极管构成半波整流电路，将交流电转换成直流电，由于采用的元件少，故线路简单且成本低，适合用做 10kW 以下小容量电动机的制动控制。  图 1　无变压器单相半波整流能耗制动控制线路 **电路工作原理分析如下：** ①**闭合电源开关 QS。** ②**启动控制。**按下启动按钮 SB_1→接触器 KM_1 线圈得电→KM_1 常开辅助触点闭合、常闭辅助触点断开、主触点闭合→KM_1 常开辅助触点闭合锁定 KM_1 线圈得电；KM_1 常闭辅助触点断开，使 KM_2 线圈无法得电；KM_1 主触点闭合使电动机得电运转。 ③**制动控制。**  ④**断开电源开关 QS。**

续表

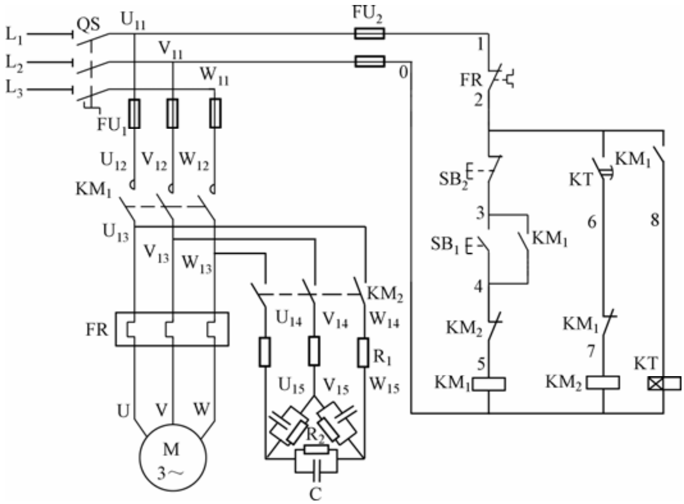
<table>
<tr><th>类型</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td>有变压器单相桥式整流能耗制动线路</td><td>有变压器单相桥式整流能耗制动线路如图 2 所示。

图 2　有变压器单相桥式整流能耗制动线路
从图 2 可以看出，该线路的控制电路部分与图 1 相同，两线路不同在于制动直流电的获取方式不同。在按下停止按钮 SB_2 后，接触器 KM_2 的主触点闭合（控制过程与图 1 相同），V、W 相电压送到变压器 TC，经 TC 降压和桥式整流器 VC 整流后，VC 输出直流电压，该直流电压经电位器 R 调节后加到电动机的 V、W 端，有直流电流流入电动机，对电动机进行能耗制动。
能耗制动具有制动平稳、准确和能量消耗小等优点，它可以通过改变直流电流大小（调节限流电阻）来改变制动力矩的大小。能耗制动的缺点是线路中所需要的直流电源装置费用高，制动力较弱（特别是低速制动时），所以能耗制动一般用在要求制动平稳、准确的场合，如立式铣床和磨床等生产机械设备中。</td></tr>
</table>

3. 电容制动

运行的电动机在停止供电后依靠惯性继续运转，此时的转子仍有剩磁，带有磁性的转子运转时其磁场切割定子绕组，定子绕组会产生电动势，若用电容将三个定子绕组连接起来，定子绕组中就有电流产生，该电流会产生磁场，该磁场与旋转的转子磁场正好相反，通过排斥作用使转子停转进行制动。

电容制动控制线路说明见表 9-27。

表 9-27　电容制动控制线路说明

关键点	说　　明
线路图	 图 1　电容制动控制线路
线路说明	**电路工作原理分析如下：** **①闭合电源开关 QS。** **②启动控制。** 按下启动按钮SB1→KM1线圈得电→ 　KM1常开辅助触头3、4闭合，锁定KM1线圈得电 　KM1常闭辅助触头断开，切断KM2线圈供电 　KM1主触头闭合→电动机得电运转 　KM1常开辅助触头2、8闭合，KT线圈得电→KT延时断开触头瞬间闭合，为KM2线圈得电作准备 **③制动控制。** 按下停止按钮SB2→KM1线圈失电→ 　KM1常开辅助触头3、4断开，解除自锁 　KM1主触头断开→电动机失电惯性运转 　KM1常闭辅助触头闭合→KM2线圈得电→ 　　KM2常闭辅助触头断开，切断KM1线圈供电电路 　　KM2主触头闭合→电动机接入三相电容制动至停止 　KM1常开辅助触头2、8断开→KT线圈失电→一段时间后，KT常开触头断开→KM2线圈失电→KM2主触头断开→三相电容断开 **④断开电源开关 QS。** 电容制动具有制动迅速（制动停车时间 1～3s）、能量损耗小和设备简单等优点，通常用于 10kW 以下的小容量电动机制动控制，特别适合用在有机械摩擦阻力的生产机械设备和需要同时制动的多台电动机。

9.10 多速异步电动机调速控制线路

当三相异步电动机定子绕组通入三相交流电后，定子绕组会产生旋转磁场，旋转磁场的转速 n_0 与交流电源的频率 f 和电动机的磁极对数 p 有如下关系：

$$n_0=60f/p$$

电动机转子的旋转速度 n（即电动机的转速）略低于旋转磁场的旋转速度 n_0（又称同步转速），两者的转速差称为转差 s，电动机的转速为：

$$n=（1-s）60f/p$$

由于转差 s 很小，一般为 0.01～0.05，为了计算方便，可认为电动机的转速近似为：

$$n=60f/p$$

从上面的近似公式可以看出，**三相异步电动机的转速 n 与交流电源的频率 f 和电动机的磁极对数 p 有关，当交流电源的频率 f 发生改变时，电动机的转速就会发生变化。通过改变交流电源的频率来调节电动机转速的方法称为变频调速；通过改变电动机的磁极对数 p 来调节电动机转速的方法称为变极调速。**下面主要介绍变极调速方法。

变极调速只适用于笼形异步电动机（不适用于绕线型转子异步电动机），它是通过改变电动机定子绕组的连接方式来改变电动机的磁极对数，从而实现变极调速。适合变极调速的电动机称为多速电动机，常见的多速电动机有双速电动机、三速电动机和四速电动机等。

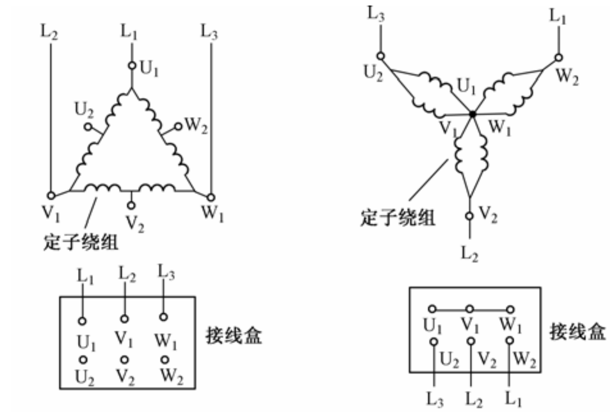
9.10.1　双速异步电动机调速控制线路

1. 双速异步电动机定子绕组的连接方式

普通异步电动机的三相定子绕组是独立的，它们各引出两根线分别与接线盒 U_1、U_2、V_1、V_2、W_1、W_2 端连接。而双速异步电动机三相定子绕组在内部已接成△形，可参见图 9-13（a）。在△形三个连接点引出线与接线盒 U_1、V_1、W_1 三个接线端连接，另外在每相定子绕组的中心点各引出一根线与 U_2、V_2、W_2 三个接线端连接，在调速控制时可采用如图 9-13 所示的两种连接方式。

图 9-13（a）为△形接法。这种接法是将三相交流电源 L_1、L_2、L_3 分别与定子绕组的 U_1、V_1、W_1 端连接，而 U_2、V_2、W_2 端悬空，定子绕组构成△形连接，该接法下电动机的磁极数为 4 极（磁极对数 p 为 2），当三相交流电源频率为 50Hz 时，电动机的转速近似为 $n=60f/p$=1500r/min（转/分钟）。

图 9-13（b）为 YY 型接法。这种接法是将三相交流电源 L_1、L_2、L_3 分别与定子绕组的 W_2、V_2、U_2 端连接，U_1、V_1、W_1 三端直接短接，定子绕组构成 YY 形连接，该接法下电动机的磁极数为 2 极（磁极对数 p 为 1），当三相交流电源频率为 50Hz 时，电动机的转速近似为 3000r/min（转/分钟）。



（a）△形接法——低速（4极）（b）YY形接法——高速（2极）

图 9-13 双速异步电动机的两种接线方式

由此可见，**双速异步电动机在 YY 形接法下的转速是△形接法时的 2 倍**。

2. 接触器控制的双速异步电动机调速线路

接触器控制的双速异步电动机调速线路说明见表 9-28。

表 9-28 接触器控制的双速异步电动机调速线路说明

<table>
<tr><th>关键点</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td>线路图</td><td>接触器控制的双速异步电动机调速线路如图 1 所示。

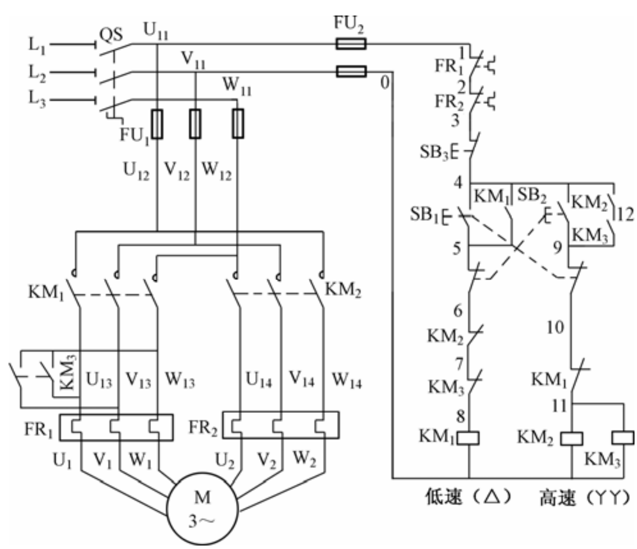


图 1 接触器控制的双速异步电动机调速线路</td></tr>
<tr><td>线路说明</td><td>电路工作原理分析如下：
①闭合电源开关 QS。
②低速启动运行控制。</td></tr>
</table>

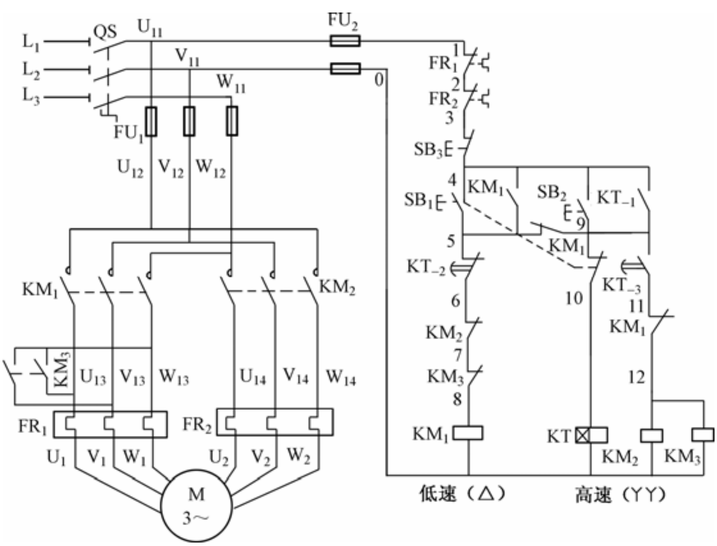
续表

关键点	说　　明
	按下低速启动运行按钮SB_1 → 　SB_1常闭触头先断开，切断KM_2、KM_3线圈供电电路 　SB_1常开触头后闭合→KM_1线圈得电 → 　　KM_1常开辅助触头闭合，锁定KM_1线圈得电 　　KM_1常闭辅助触头断开→切断KM_2、KM_3线圈供电电路 　　KM_1主触头闭合→电动机得电并接成△形低速运转 ③高速启动运行控制。 按下高速启动运行按钮SB_2 → 　SB_2常闭触头先断开→KM_1线圈失电 → 　　KM_1常开辅助触头断开，解除自锁 　　KM_1主触头断开，电动机暂时失电 　　KM_1常闭辅助触头闭合 　SB_2常开触头后闭合 （KM_1常闭辅助触头闭合与SB_2常开触头闭合共同）→KM_2、KM_3线圈均得电 → 　　KM_2、KM_3常开辅助触头闭合，锁定KM_2、KM_3线圈得电 　　KM_2、KM_3主触头闭合，电动机得电并接成YY形高速运转 　　KM_2常开辅助触头断开，切断KM_1线圈供电电路 ④**停转控制**。若按下停止按钮 SB3，KM_1、KM_2、KM_3线圈均失电，KM_1、KM_2、KM_3主触点均断开，电动机失电停止运转。 ⑤**断开电源开关 QS**。

3. 时间继电器控制的双速异步电动机调速线路

时间继电器控制的双速异步电动机调速线路说明见表 9-29。

表 9-29　时间继电器控制的双速异步电动机调速线路说明

关键点	说　　明
线路图	 图 1　时间继电器控制的双速异步电动机调速线路

续表

<table>
<tr><th>关键点</th><th>说　　明</th></tr>
<tr><td>线路说明</td><td>

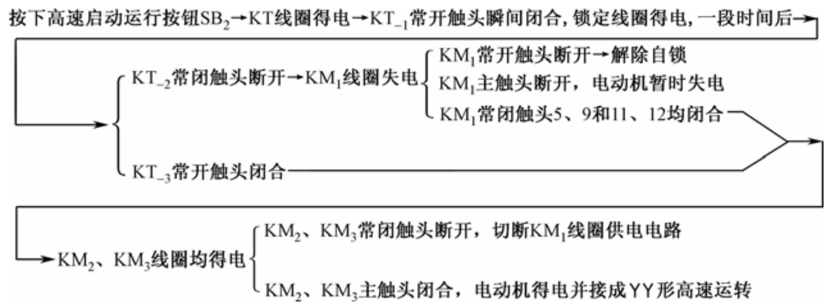
电路工作原理分析如下：

①闭合电源开关 QS。

②低速启动运行控制。



③高速启动运行控制。



④停转控制。按下停止按钮 SB_3，KM_1、KM_2、KM_3 线圈均失电，KM_1、KM_2、KM_3 主触点均断开，电动机失电停止运转。

⑤断开电源开关 QS。

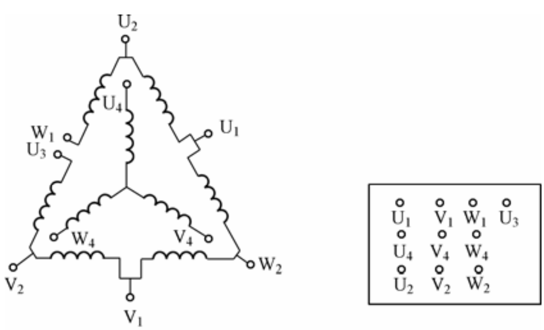
</td></tr>
</table>

9.10.2　三速异步电动机调速控制线路

1. 三速异步电动机定子绕组的连接方式

三速异步电动机有两套定子绕组：一套为双速绕组，有 U_1、V_1、W_1、U_3、U_2、V_2、W_2 七个接线端，如图 9-14 所示；**另一套为单速绕组，有 U_4、V_4、W_4 三个接线端。**因此三速异步电动机接线盒内有十个接线端。**改变两套定子绕组的接线方式可以改变电动机的磁极对数，就能进行变极调速控制。**

三速异步电动机常见的接线方式如图 9-15 所示。



两套定子绕组　　　　接线盒

图 9-14　三速异步电动机的定子绕组与接线盒

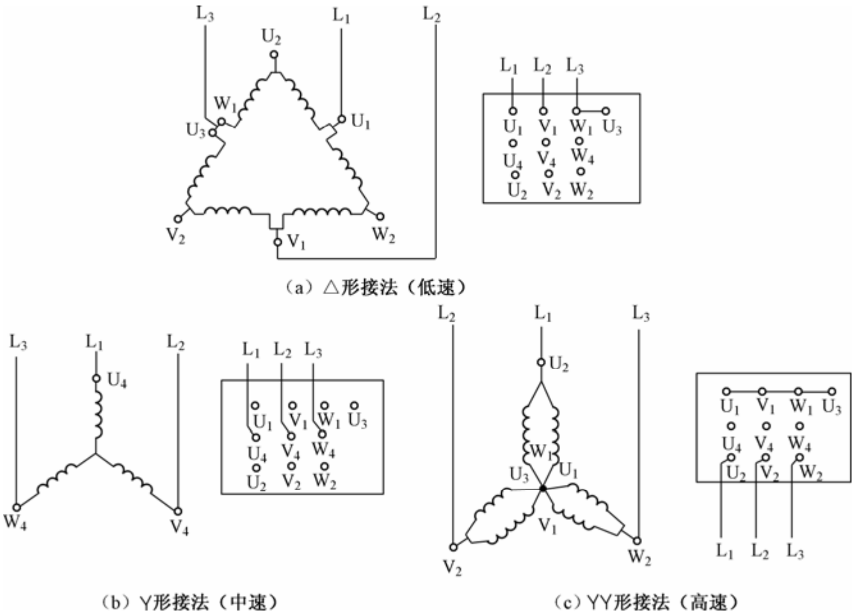
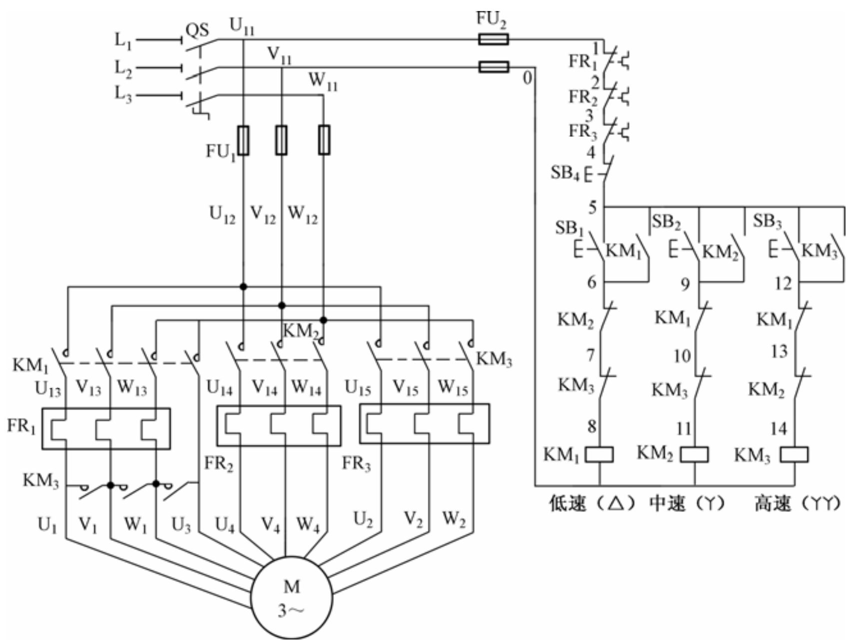


图 9-15　三速异步电动机常见的接线方式

2. 接触器控制的三速异步电动机调速线路

接触器控制的三速异步电动机调速线路说明见表 9-30。

表 9-30　接触器控制的三速异步电动机调速线路说明

关键点	说　　明
线路图	 图 1　接触器控制的三速异步电动机调速线路

续表

关键点	说　　明
线路说明	电路工作原理分析如下： ①闭合电源开关 **QS**。 ②低速启动运行控制。 按下低速启动运行按钮SB_1→KM_1线圈得电 { KM_1常开触头闭合，锁定KM_1线圈得电；KM_1常闭触头9、10和12、13均断开，切断KM_2、KM_3供电电路；KM_1主触头闭合 }→三相电源通过KM_1主触头送到电动机U_1、V_1、W_1端，U_3、W_1端也通过主触头短接→电动机接成△形低速运行 ③低速转中速运行控制。 在低速转中速前，需先按下停止按钮SB_4→KM_1线圈失电→KM_1主触头断开→再按下中速启动运行按钮SB_2→KM_2线圈得电 { KM_2常开触头闭合，锁定KM_2线圈得电；KM_2常闭触头6、7和13、14均断开，切断KM_1、KM_3供电电路；KM_2主触头闭合 }→三相电源通过KM_2主触头送到电动机U_4、V_4、W_4端→电动机接成Y形中速运行 ④中速转高速运行控制。 在中速转高速前，先按下停止按钮SB_4→KM_2线圈失电→KM_2主触头断开→再按下高速启动运行按钮SB_3→KM_3线圈得电 { KM_3常开触头闭合，锁定KM_3线圈得电；KM_3常闭触头7、8和10、11均断开，切断KM_1、KM_2供电电路；KM_3六个主触头闭合 }→三相电源通过KM_3主触头送到电动机U_2、V_2、W_2端，同时U_1、V_1、W_1、U_3通过KM_3主触头短接→电动机接成YY形高速运行 ⑤停转控制。按下停止按钮 SB_4，KM_1、KM_2、KM_3线圈均失电，KM_1、KM_2、KM_3主触点均断开，电动机失电停止运转。 ⑥断开电源开关 **QS**。